



**APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN LAS GRANJAS
LECHERAS DE BOYACÁ PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE
PARA CONSUMO Y GENERACION DE ENERGIA**

Elaborado por:

Ana María Acevedo Quintero – Ingeniería Química

Javier Andrés Sánchez Delgado – Ingeniería Química

Jesús Edilberto Martínez Granados – Ingeniería de Sistemas

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Proyecto de integración de Pregrado

Septiembre, 2022

Bogotá, D.C.



Resumen

En Colombia la industria del sector lácteo aporta 24,3% del Producto Interno Bruto agropecuario, lo que se traduce en 1,23% del PIB total nacional (Vega, J.P. 2018)., Durante los últimos años la industria láctea ha ido creciendo exponencialmente lo que ha resultado en la generación a gran escala de estiércol, este es uno de los principales desechos producidos en las granjas lecheras, además representa grandes fuentes potenciales de contaminación, ya que puede contaminar los ríos, ecosistemas del suelo y el agua potable subterránea, afectando así a todos los organismos vivos cercanos, dentro del estiércol se encuentran presentes muchos agentes patógenos responsables de enfermedades infecciosas o parasitarias, por tal motivo el estiércol requiere un tratamiento adecuado.

Hoy por hoy existen nuevas tecnologías y dispositivos que permiten el aprovechamiento de residuos, el biodigestor es uno de ellos, es un dispositivo técnico para transformar excrementos humanos y/o animales u otros residuos orgánicos en biogás. Esta transformación pasa por un proceso natural de fermentación que degrada la materia orgánica en un ambiente anaeróbico, es decir sin oxígeno. El gas resultante de esta fermentación es el metano (CH₄).

Este proyecto busca determinar cuáles son los parámetros y variables para la producción de biogás mediante biodigestores, esto con el fin de reducir la contaminación hídrica generada por el estiércol, además de determinar los parámetros de diseño de los biodigestores. La producción de biogás permitirá mejorar el aire que respiran los granjeros mediante la mitigación de gases de efecto invernadero y ayudara a la preservación de organismos vivos, Además de contribuir a la economía municipal ya que podrán usar el biogás para cocción y para la generación de energía eléctrica.



1. Introducción

El tocino, las carnes frías y los productos lácteos están lejos de ser los únicos productos de la cría de animales. Este último también viene con una cantidad significativa de estiércol. Los animales de granja por sí solos producen 130 veces más desechos que la población humana mundial. Una vaca lechera de aproximadamente 612 kg produce alrededor de 22,706 kg de estiércol por año es decir que en promedio produce 62 kg por día, seguido de las vacas que son destinadas para consumo de carne con 13,444 kg/año, por tal motivo la vaca lechera es considerada la mayor productora de estiércol(Hofmann & Beaulieu, 2001).

El estiércol es uno de los principales desechos producidos en las granjas lecheras, además representa grandes fuentes potenciales de contaminación, ya que puede contaminar los ríos, ecosistemas del suelo y el agua potable subterránea, puesto que en un proceso natural, el nitrógeno del estiércol se convierte en nitrato, lo que puede comprometer la calidad del agua potable y causar problemas de salud a los humanos, además el fósforo en el estiércol puede causar un crecimiento excesivo de algas en nuestros lagos y ríos hasta el punto de hacerlos inhabitables para los peces y otras formas de vida acuática.

Según el ministerio de agricultura, Colombia es el veinticuatroavo productor de leche en el mundo con aproximadamente 6.500.000 de animales productores. A nivel nacional Boyacá es uno de los principales departamentos productores de leche. El sector lácteo aporta 24,3% del Producto Interno Bruto agropecuario, lo que se traduce en 1,23% del PIB total nacional (Vega, J.P. 2018). La producción de leche es una de las principales actividades económicas del departamento de Boyacá, pero las granjas dedicadas a la producción de leche en el departamento



son un gran foco de generación de gases de efecto invernadero (GEI) Además que la gran mayoría de las granjas todavía hacen uso de leña para poder cocinar puesto que al estar en zonas tan aleañas no cuentan con el servicio domiciliario de gas natural y energía eléctrica.

Hoy por hoy los grandes países se la quieren jugar por la transición energética y Colombia es uno de ellos, esta consiste en abandonar los combustibles fósiles en favor de las energías renovables: solar, eólica, hidráulica, biomasa, etc. El objetivo es transformar de forma sostenible todos los sectores energéticos, desde la producción hasta el consumo final, y limitar las emisiones de gases de efecto invernadero. La transición energética es específica de cada país, pero sus objetivos son universales: luchar contra el calentamiento global, la escasez de combustibles fósiles y la pobreza energética, fuente de desigualdad social.

Como se menciona anteriormente el estiércol de vaca es un gran contaminante tanto por las emisiones de GEI expulsadas a la atmosfera como los problemas que genera en las fuentes hídricas, para hacer frente a esta problemática ambiental que sufren las granjas lecheras en Boyacá se establece el aprovechamiento del estiércol para la producción de biogás mediante biodigestores para uso como combustible para la generación de energía eléctrica y cocción de alimentos.



2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar una metodología para reutilizar el estiércol producido en las granjas lecheras de Boyacá, mediante un biodigestor para la producción de biogás el cual tendrá uso como combustible para la generación de energía y cocción de alimentos, esto con el propósito de mitigar las emisiones de GEI y contaminación hídrica producida por este sector, además de contribuir a la transición energética, así mismo promoviendo la producción sostenible.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar los componentes involucrados en cada de las sustancias y materias orgánicas implicadas en el proceso.
- Realizar una revisión bibliográfica que permita conocer los parámetros de diseño que requiere un biodigestor.
- Identificar los beneficios económicos, sociales y ambientales que trae la implementación de biodigestores



3. Definición del problema

Los animales de granja por sí solos producen 130 veces más desechos que la población humana mundial. Una vaca lechera de aproximadamente 612 kg produce alrededor de 22,706 kg de estiércol por año es decir que en promedio produce 62 kg por día. El estiércol de vaca es considerado de los grandes agentes productores de gases de efecto invernadero. Por esto es imprescindible hallar una manera de combatir las emisiones de metano sin comprometer el rendimiento de esta industria.

Algunas granjas productoras de leche tienen difícil acceso tanto al gas natural y a la energía eléctrica. Lo que lleva a estas familias a cocinar con leña, lo cual es conocido por traer afectaciones a la salud, el humo de esta leña contiene partículas finas, también llamadas material particulado o PM2,5. Estas partículas microscópicas pueden entrar en los ojos o sistema respiratorio, y provocar ardor en los ojos, goteo nasal, y enfermedades, como bronquitis. Las partículas finas pueden empeorar los síntomas del asma y desencadenar ataques de asma. Las partículas finas también pueden desencadenar infartos de miocardio, ritmo cardíaco irregular e insuficiencia cardíaca, en especial en personas que ya están en riesgo por estas enfermedades (EPA 2022).

Una de las opciones para mitigar estas dos problemáticas tanto ambiental como peligro para la salud humana es la utilización de biodigestores, los cuales son capaces de optimizar la generación de metano para que este sea usado ya sea para cocinar o generar energía para las poblaciones con difícil acceso a estos servicios, y gracias a su bajo costo y bajo nivel de complejidad.



4. Justificación

El sector primario es uno de los principales componentes de desarrollo económico del país, esto a su vez lo convierte en uno de los sectores que generan grandes problemáticas a nivel ambiental, estas forjadas por el impropio tratamiento y aprovechamiento de los residuos generados por este ente. Dentro de este sector se encuentran la industria láctea, la cual tiene a Boyacá como uno de los departamentos que mas produce leche a nivel nacional, uno de los principales residuos que generan las granjas lecheras son el estiércol procedente por las vacas, donde una vaca lechera produce en promedio 62 kg de estiércol por día.

En algunas granjas lecheras de Boyacá aun no existen los servicios básicos del gobierno municipal, como lo es la energía, gas y la recolección de basuras, esto se debe a la gran distancia que se encuentran de las zonas urbanas. Debido al mal manejo de los residuos generados por el ganado vacuno se está estropeando y contaminado las fuentes hídricas boyacenses, lo que claramente viene afectando a la población civil, a los suelos, a la atmosfera, a la fauna y flora que residen en las cercanías de las fuentes hídricas ya que este residuo tiene grandes cantidades de fósforo y nitrógeno. Además, considerando que en estas áreas aún se hace uso de la quema de leña para la preparación de alimentos debido al difícil acceso al gas natural y al gas de pipeta, el cual implica un daño a la salud y la atmosfera puesto que el humo de leña contiene muchos contaminantes nocivos tóxicos. Otro factor importante es la energía eléctrica ya que esta fuera de alcance de la mayor parte de las granjas lecheras, ya las que tienen acceso lo hacen mediante plantas generadoras que hacen uso de combustibles fósiles como la gasolina.



Este proyecto busca implementar biodigestores en las granjas lecheras de Boyacá con el fin de producir biogás para diferentes usos, esto contribuye al desarrollo económico, social y ambiental del departamento, además de aportar a los objetivos de desarrollo sostenible.

5. Análisis de requerimientos

Para producir biogás a partir del estiércol de vaca, al momento de establecer los parámetros de diseño se debe tener en cuenta los componentes y factores involucrados en el proceso. El primer factor es el tipo de residuo orgánico que se utilizara además de esto los componentes que contiene.

Uno de los propósitos de este estudio requirió consideraciones en el diseño del biodigestor. Primero, era necesario considerar el consumo de energía de la granja lechera. A partir de allí, se planeó la capacidad de un biodigestor para generar energía de acuerdo a las necesidades de la finca. Adicionalmente, era necesario considerar que la zona de Sogamoso Boyacá era un lugar ideal para la construcción y modificación de biodigestores. Esto permitió ajustes y diseños óptimos para cada área específica; haciendo estos diseños simples y optimizados. Cada área requería configuraciones o requisitos específicos que serían difíciles de implementar con otras ubicaciones.

El uso de estiércol animal de las granjas lecheras es ideal para crear biodigestores. Esto se debe a que no todas las fincas tienen fácil acceso a una gran cantidad de desechos orgánicos. Al usar estos desechos, las economías rurales pueden beneficiarse, por ejemplo, al usar los desechos para criar animales. Así, el tercer apartado se centra en basar el diseño de los biodigestores en la disponibilidad de residuos orgánicos procedentes del estiércol animal.

Para determinar correctamente los requisitos necesarios de un biodigestor, primero debemos considerar para qué se utilizará el digestor. Esta consideración nos lleva a analizar el volumen requerido y las medidas del biodigestor. Una vez que determinamos estas medidas, se



deben hacer tres consideraciones importantes. Primero, tenemos que determinar cuánto biogás producirá el biodigestor. A continuación, tenemos que dar cuenta de cuánto biol se producirá; esto se debe a que el biodigestor debe cargarse regularmente con cantidades iguales de biol diaria o semanalmente. Finalmente, tenemos que considerar el impacto ambiental; esta consideración se debe a nuestra tendencia a desechar los desechos orgánicos, que pueden dañar potencialmente nuestro medio ambiente, en primer lugar. Mediante el uso de un digestor orgánico, podemos ayudar a proteger nuestro medio ambiente y asistir en la transferencia de prácticas y hábitos saludables.

Hay muchos plásticos diferentes disponibles para elegir al diseñar un biodigestor. Una vez que encontremos el volumen del líquido del digestor, comenzaremos a diseñarlo. Esto requiere darle una forma al digestor, que puede ser determinada por las dimensiones de la zanja en la que se colocará. Además de esto, es fundamental tener en cuenta que la elección de geomembranas permite una mayor flexibilidad a la hora de elegir la circunferencia del biodigestor.

Al satisfacer las necesidades de sus clientes, los consumidores rurales de energía de Colombia pueden utilizar un biodigestor de 200 litros. Esto permite tres meses de generación de gas con la misma carga. Al hacer esto, están demostrando un compromiso con la confiabilidad al garantizar un uso de energía efectivo y eficiente.

El rendimiento de un biodigestor se ve afectado por consideraciones importantes al configurar el dispositivo. Estas consideraciones incluyen el pH del biodigestor, la temperatura, el tiempo de residencia, el tipo y la cantidad de alimento suministrado e incluso la región donde se encuentra. (Ávila Hernández et al., 2018), que se describen a continuación:

- El proceso de fermentación se clasifica por el rango de temperatura del biodigestor y el tiempo de retención (Alcayaga et al. 1999):



- Fermentación psicrófilico, para un rango de temperatura entre 10°C y 20°C y más de 100 días de retención.
- Fermentación mesofílica, para un rango de temperatura entre 20°C y 45°C y aproximadamente 30 a 60 días de retención.
- Fermentación termofílica, para un rango de temperatura entre 45°C y 65°C y más de 10 a 15 días de retención.
- La temperatura del digestor afecta la velocidad a la que se lleva a cabo la digestión anaeróbica. Los cambios significativos en la temperatura de operación del digestor pueden alterar drásticamente la velocidad del proceso. Además de acelerar el proceso, las temperaturas más altas también permiten un mayor crecimiento microbiano en el tanque. Esto conduce a cambios de velocidad aún más drásticos, así como a una mayor producción de gas (FAO, 2021)
- La producción de biogás depende de los compuestos específicos de la materia orgánica utilizada. Cualquier material se puede utilizar en la fermentación anaeróbica para crear biogás; depende de que material este hecho. (FAO, 2021)
- Los tipos de alimentación y biodigestores elegidos están determinados por una variedad de restricciones, incluidas las económicas, topográficas, sociales y ambientales.



6. Marco teórico

El gas natural es un subproducto que se forma de la producción de petróleo, antiguamente este era quemado en los campos petroleros, dado que no le brindaba un uso, al ser también un hidrocarburo genera un impacto en el medio ambiente. En la sociedad colombiana el uso del gas natural se emplea para el consumo doméstico, como combustible industrial y producción de energía.

El metano es el componente principal del gas natural, un gas altamente inflamable formado por procesos biológicos, principalmente la descomposición de materia orgánica muerta en las profundidades subterráneas.

6.1. Biogás

6.1.1. Definición

El biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros compuestos que se genera por la degradación microbiana de materiales orgánicos de origen vegetal o animal en ausencia de aire, denominada digestión anaeróbica (Arellano et al., 2017).

6.1.2. Composición

El biogás es denominado un gas combustible que se produce por la descomposición microbiana de los desechos. Está compuesto por varios elementos como:

Tabla 1. Composición porcentaje volumen a volumen del biogás

Compuestos	%V
	/V
Metano (CH ₄)	50- 75



Dióxido de Carbono (CO ₂)	de 25-50
Nitrógeno (N ₂)	0-10
Hidrogeno (H ₂)	0-1
Sulfuro de hidrogeno (H ₂ S)	0-3
Oxigeno (O ₂)	0-2

Fuente: Elaboración propia

6.2. Procesos de digestión

En la actualidad existe dos procesos de digestión, la digestión aeróbica y la digestión anaeróbica, cada uno de estos tiene un objetivo principal, la elección de que tipo de proceso se debe utilizar se da por el producto que quiera originar.

6.2.1. Digestión aeróbica

La digestión aeróbica es un proceso microbiano que ocurre con la disponibilidad de oxígeno. La materia orgánica se oxida en condiciones aeróbicas y como resultado se producen productos como nitrato, fosfato y dióxido de carbono (Martín et al., 2015)

6.2.2. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica (DA): Es un proceso único en el que diferentes especies microbianas descomponen materiales orgánicos en ausencia de oxígeno (Yousuf et al., 2020) Además de ser un proceso que se está practicando a nivel mundial para aprovechamiento de los desechos derivados de la ganadería y agricultura para transformarlo en biogás. En otras palabras, es el proceso que permite la producción de biogás.



6.3. Obtención de biogás

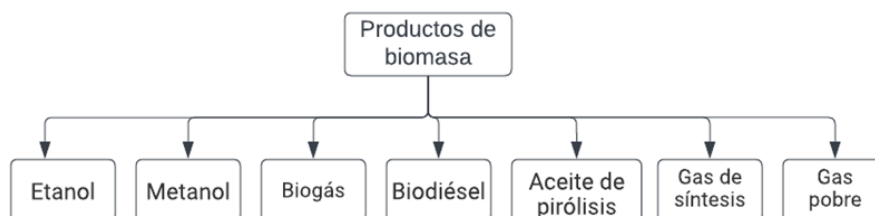
El proceso de DA se compone de cuatro pasos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La hidrólisis es el primer paso de la DA donde las enzimas son secretadas por microorganismos para descomponer moléculas orgánicas complejas en azúcares más simples. La acidogénesis es el segundo paso en el que estos azúcares más simples se convierten en ácidos orgánicos. La acetogénesis es el tercer paso en el que estos ácidos orgánicos se convierten en ácido acético e hidrógeno. El paso final, la metanogénesis, es donde el ácido acético se convierte en metano y dióxido de carbono.

6.4. Biomasa

La biomasa es cualquier materia orgánica (madera, cultivos, algas, desechos animales) que se puede utilizar como fuente de energía (Demirbas & Demirbas, 2007) Históricamente la biomasa ha sido fuente de energía, dado que las primeras poblaciones hacían uso de la madera para cocinar alimentos y como medio de calefacción, por tal razón es considerada una de las fuentes más antiguas.

Las ventajas de la biomasa son que es un recurso renovable, es relativamente eficiente de producir y puede usarse para producir una diversidad de productos. Un producto relevante de la biomasa son los biocombustibles, que sustituyen a los combustibles derivados del petróleo.

Figura 1. Productos de la biomasa





Fuente: Elaboración propia

6.4.1. Tipos

La biomasa se clasifica en dos grupos, biomasa natural y residual.

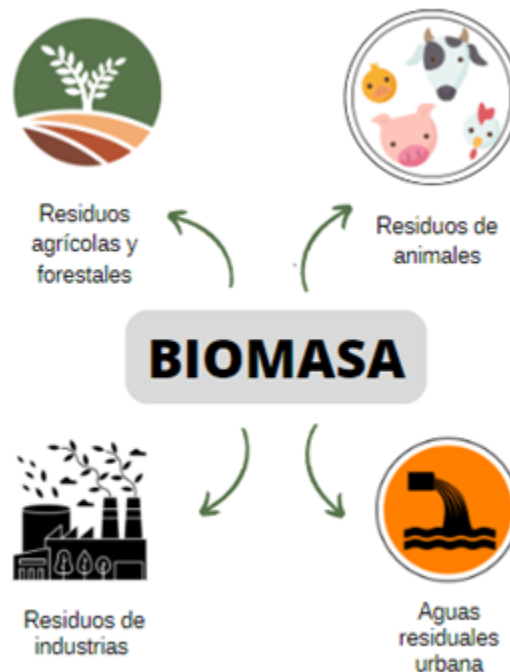
6.4.1.1. Biomasa natural

Es la que produce la naturaleza, es decir que no tiene ningún tipo de intervención humana.

6.4.1.2. Biomasa residual

Son los residuos orgánicos derivados de la actividad humana, esta se clasifica en dos, residual seca y residual húmeda. La biomasa residual seca es consecuencia de las actividades agrícolas y forestales, mientras que la biomasa húmeda generalmente proviene de los residuos del sector ganadero (purines), aguas residuales urbanas e industriales.

Figura 2. Productores de biomasa



Fuente: Elaboración propia



6.5. Biodigestor

Un biodigestor es un sistema que digiere biológicamente materia orgánica, ya sea de forma anaeróbica (sin oxígeno) o aeróbica (con oxígeno). Los microbios y otras bacterias descomponen los materiales orgánicos en un biodigestor (Mallikarachchi, 2020)

6.5.1. Tipos

6.5.1.1. Plantas de globo

Caracterizado por tener en la parte superior del digestor una bolsa en el cual se almacena el gas generado, su entrada y la salida se encuentran en la misma superficie de la bolsa. Algunas de sus ventajas son su bajo costo, fácil transportación, simple construcción, manejo de altas temperaturas de digestión, una limpieza, mantenimiento y vaciado, más sencilla a otros digestores similares, a pesar de esto tienen un corto tiempo de vida, y alta susceptibilidad a daños.

6.5.1.2. Plantas de Domo Fijo.

Se caracterizan por tener un recipiente fijo para el almacenamiento del gas, que se ubica en la parte superior. Al inicio de la producción del gas, la mezcla se mueve hacia el tanque de compensación. Sus ventajas son los bajos costos de construcción y su larga vida útil. El biodigestor de domo fijo al ser una construcción subterránea ahorra espacio y lo protege de posibles cambios de temperatura externos. Sus desventajas son los frecuentes problemas con la permeabilidad. Estos biodigestores son solo recomendables cuando puede ser supervisada por técnicos experimentados de biogás.

6.5.1.3. Plantas de tambor flotante (Tipo Hindú)

Estos al igual que el de domo fijo es subterráneo y posee un recipiente móvil para gas. El recipiente para gas flota sobre la mezcla de fermentación o en una bolsa de agua. El gas se recolecta en el tanque de gas, que se levanta o desciende, de acuerdo con la cantidad de gas contenido en



este. Algunas de sus ventajas son su simple y fácil operación; el volumen almacenado de gas es visible directamente gracias a su almacenamiento. La presión es constante, determinada por el peso del recipiente de gas. La construcción es sencilla comparado con el resto; si se presenta algún tipo de error en la construcción no influye a mayor medida en su funcionamiento y producción de gas. Gracias a partes como es el tambor de acero, la susceptibilidad a la corrosión, hacen que la vida útil de la planta sea más corta; además se tienen costos fijos de mantenimiento.

6.5.2. Partes de un Digestor.

6.5.2.1. Tanques de carga

Es el conducto por donde se alimenta el digestor, está construido de ladrillo ordinario y tiene un cemento aplanado en su superficie interior.

6.5.2.2. Tanque de descarga

Es la línea por donde se retiran los lodos residuales resultantes de la digestión anaerobia y se realiza de la misma forma que el tanque de carga. Cuando se carga el digestor, la presión del material entrante fuerza una cantidad igual de material ya tratado (o agotado) a través del tubo de salida.

6.5.2.3. Tanque de Almacenamiento de gas.

En los digestores de domo fijo y flotante, el tanque de almacenamiento es una estructura de ladrillos redondos o cuadrados con una superficie de cemento pulido en el interior, y en los fermentadores de globo está alojado en una bolsa de plástico que resiste la corrosión y los ambientes agresivos. El gas generado se almacena para tenerlo disponible en cantidad suficiente en cada contenedor hermético cuando sea necesario.

6.5.2.4. Línea de conducción



Línea de Línea de conducción para una instalación típica, sus dimensiones dependen del caudal de gas a transportar y de la distancia entre la instalación y el punto de uso.

Estos biodigestores utilizan casi siempre utilizan tuberías de PVC ya que este material no se degrada por la exposición al sulfuro de hidrógeno. La tubería de PVC está enterrada o cubierta para evitar el deterioro por la luz solar. O se coloca en una posición elevada para evitar daños físicos por parte de personas o animales.

6.5.2.5. Válvulas

Se utilizan al menos dos válvulas para gas, la válvula principal se instala justo al comienzo de la tubería y en el niple de salida. El segundo se instala en el punto de consumo al final de la línea. Estas válvulas deben estar hechas de acero inoxidable o PVC para evitar la corrosión por sulfuro de hidrógeno. (Corona I. 2007)

6.5.2.6. Trampas

El gas debe limpiarse antes de su uso. El propósito de la limpieza es eliminar o reducir el contenido de sulfuro de hidrógeno para evitar la corrosión del equipo y reducir el contenido de agua presente en el gas como resultado del proceso de digestión. (Corona I. 2007)

6.5.2.7. Trampas de ácido sulfhídrico

Consisten en un recipiente lleno de material ferroso finamente dividido, formando un lecho poroso a través del cual debe fluir el gas para reaccionar con el metal y asentarse en el lecho. Estos materiales tienen la ventaja de ser económicos y ofrecer poca resistencia al flujo de gas. Este aspecto es importante debido a las bajas presiones que se manejan en este tipo de sistemas.



La trampa de sulfuro de hidrógeno también actúa como trampa de llamas, no solo debido a la presencia del relleno, sino también debido al mayor diámetro del recipiente en relación con el conducto.

6.5.2.8. Trampas de agua

El agua se separa cuando la corriente encuentra en su trayectoria una exención brusca y una contracción posterior. Para lograr este objetivo basta con instalar en la línea un accesorio idéntico a las trampas de sulfuro de hidrógeno, con la diferencia de que no es necesario rellenar con material ferroso.

Las trampas están provistas de una válvula de drenaje por donde se debe evacuar periódicamente el agua depositada en el fondo. (Corona I. 2007)

6.5.3. Ventajas y desventajas

La producción de biogás trae beneficios económicos y así mismo puede ser utilizado como alternativa al combustible y gas de cocina para uso personal o comercial con elevado poder energético, requiere una baja inversión inicial, únicamente su instalación; para el mantenimiento habitual, se puede hacer por el mismo usuario en la mayoría de los casos, por ello es posible eliminar CO₂ de manera eficiente, y gracias a esta alternativa se disminuyen problemas sanitarios generados por la cocción de alimentos con leña en hogares rurales sin acceso al servicio de gas natural por falta de infraestructura. (Tobon A. 2018) (Cabildo Miranda, y otros, 2008).

En cuanto a las desventajas se debe considerar que el suministro al biodigestor de material orgánico debe ser permanente, y normalmente por esta razón se caracteriza por los malos olores, y al mezclarse con el aire, es decir, el oxígeno puede generar una reacción súbita de oxidación generando presión y elevación de temperatura. (Tobon A. 2018).



6.5.4. Factores que influyen en el proceso

A continuación, se referencian aspectos que permiten la obtención óptima del metano durante el proceso de digestión anaerobia. Así, diferentes autores han determinado parámetros de diseño e instalación de biodigestores anaerobios, en la Tabla 2 se relacionan algunos aspectos tomados en cuenta como referencia. (Tobon A. 2018)

Tabla 2. Factores que influyen en el proceso

Parámetro	Observaciones	Autor
Temperatura	condición mesófila (25-40°C) temperatura óptima de 35 ° C termófila (50-65 °C) c	(Pavithran, Kannan, Raja Jayasingh, & Ganesh Karthikeyan, 2015)
pH	6,7-7,5	(Guo Guo, 2010)
Relación C-N	20-30	(Guo Guo, 2010)
Contenido de MS	20-30	(Guo Guo, 2010)
C:N:P:S	600: 15: 5: 3	(Guo Guo, 2010)
Tiempo de Retención (días) de acuerdo al ambiente	Psicrofilico > 40 Mesofilico 10 – 40 Termofilico < 10	(Olaya, 2006)

Fuente: (Tobón Abello, 2018)



7. Análisis de restricciones

Las restricciones del proyecto tienen principalmente derivaciones ambientales, sociales, económicas, de salud y seguridad. A continuación, se describe en que consisten y el por qué es un limitante para la ejecución del proyecto.

7.1. Ambientales

Un indicador de impacto ambiental mide el tamaño de un impacto en un concepto o elemento asociado al impacto. Lo ideal es una medida de la magnitud del impacto, al menos en un sentido cualitativo, pero también es posible una medida cuantitativa (Conesa & Conesa, 2011)

Según el marco teórico, los biodigestores no producen muchos gases de efecto invernadero. Sin embargo, el uso de desechos orgánicos para crear estos digestores requiere capacitación y una regulación estricta. Más específicamente, usar demasiados desechos puede dañar el ecosistema circundante. Además, los problemas de salud se observan en las primeras etapas de desarrollo. Básicamente, la transición a un sistema de biodigestor requiere una consideración cuidadosa con respecto al impacto potencial en la salud de las personas y el medio ambiente.

Al construir un biodigestor, se observan efectos ambientales negativos iniciales. Estos efectos se pueden remediar fácilmente durante los períodos de inicio y funcionamiento, o con ajustes menores. Estos efectos incluyen cambios en la construcción del suelo, el paisaje y el hábitat.

7.2. Sociocultural

En la parte sociocultural se debe tener en cuenta que, al momento de adquirir un biodigestor trae consigo cambios en el estilo de vida, y cambios en el manejo de los residuos de las personas que van a hacer uso de este.

Es necesario contar con cuidados, buenas prácticas que garanticen su eficiencia, correcto funcionamiento, así como la prevención de posibles accidentes debidos a su mal manejo. A



continuación, se describirán algunas recomendaciones para aprovechar el biodigestor de la mejor manera posible.

- Evita arrojar papeles u otros materiales extraños al inodoro, tales como toallas higiénicas y plásticos.
- No utilizar productos de limpieza abrasivos o desinfectantes como el cloro, ácidos o productos antibacteriales, esto para no perjudicar a la población bacteriana responsable del tratamiento microbiológico. Generalmente el jabón es biodegradable por lo que no afecta al funcionamiento del biodigestor, pero es preferible separar las aguas que contengan jabón del lavado de ropa y de la ducha para que se drenen directamente en el pozo de absorción y así evitar que sus componentes ataquen las bacterias contenidas en el biodigestor, afectando su funcionamiento.
- No retirar los filtros del biodigestor, estos aseguran que ninguna materia extraña ingrese y afecte su efectividad
- Evita utilizar ácido muriático para limpiar el baño.
- No sobrepasar el número de usuarios indicado por la capacidad del biodigestor.
- Para limpiar utilizar productos biodegradables y poco abrasivos.

7.3. Económicas

El costo de su refinamiento es de bajo costo para el diseño del biodigestor, ya que esto puede facilitar la construcción de varios biodigestores que sean accesibles a todos los que estén interesados en obtenerlo, teniendo en cuenta estos organismos La implementación del biodigestor se pretende que sea realizadas en zonas rurales.



El impacto económico que pueden sentir los hogares al ser dueños de su propia fuente de combustible para cocinar, dependerá del valor de los cargos en que incurran en función del tipo de energía que utilizaban anteriormente, además del costo de oportunidad que aumenta a medida que cambia la situación socioeconómica. La mayoría de los hogares todavía utilizan leña para cocinar, pero este material suele provenir de árboles dentro de la parcela, por lo que los beneficios económicos que representa el biogás en lugar de la leña no se reflejan directamente en la economía del hogar.

Se puede determinar el costo de cocinar con leña, asignando valor económico únicamente al tiempo que tardan los agricultores en recolectar este material, y para el uso de gas licuado de petróleo (GLP), el precio del cilindro, teniendo en cuenta el tamaño del cilindro y su duración a la familia, así como el costo del transporte a casa.

Cuando sólo se consideran los aspectos económicos que afectan al bolsillo de las familias que son directos y visibles, sólo se pueden considerar los costos que implica la compra de gas GLP. Esto se debe a que los parceleros, las personas que recolectan leña, usan su propia tierra para recolectar leña para combustible. Esto significa que no incurren en ningún gasto monetario, sino que utilizan una fuente de combustible que no requiere gastos. De manera similar, las familias pueden usar biogás sin incurrir en costos relacionados. Sin embargo, usar esta fuente de energía no requiere gastar dinero; en cambio, es como una ayuda que reemplaza a otros combustibles y fertilizantes químicos. Además, podrían emplear biol como biofertilizante para mejorar el rendimiento de los cultivos.

7.4. Legales



Debido a que el biodigestor fue desarrollado de acuerdo con la ley colombiana, fue necesario considerar las leyes y reglamentos pertinentes para el desarrollo de este estudio. Estos estaban relacionados tanto con las fuentes de energía renovables como con los biodigestores.

Ley 1715 de 2014: Su propósito es fomentar el desarrollo de fuentes de energía renovables, así como producir y utilizar estas energías. La ley beneficia al sector privado al incentivar la producción de estas nuevas tecnologías. Además, se formaron entidades públicas con el propósito de promover el uso de energías renovables. Estos incluyeron el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Social, mejor conocido como MADS, junto con la Comisión de Regulación de Energía y Gas, también conocida como CREG. Además de estas entidades públicas, se crearon tres organismos públicos más: el Ministerio de Hacienda y Crédito Público, la CAR —o Corporación Autónoma Regional— y la UPME —o Unidad de Planeación Minero Energética—. Todas estas entidades se establecieron para regular todos los aspectos de la energía, incluidas las fuentes no convencionales, dentro de su jurisdicción.

Con la resolución CREG 202 de 2013 Los proyectos de biogás reciben financiación específica además de los proyectos de energía rural. Cualquier persona que intente expandir una empresa con fondos no está permitida.

Evaluar la factibilidad de estos fondos de servicios energéticos, como el Fondo de Cuota Especial de Desarrollo “FECF” y el Sistema General de Regalías “SGR”, puede ayudar a aplicarlos(UPME, 2015) .

La Ley 99 de 1993 El Ministerio del Ambiente implementa las políticas de recursos naturales formuladas a través del sistema nacional SINA. Estas políticas se enfocan en el proceso de desarrollo económico y social del país a través de proyectos que apoyen la vida saludable y productiva del ser humano en armonía con la naturaleza. Esto se logra protegiendo las áreas de



recarga de acuíferos, páramos y nacimientos de agua. Además de esto, el ministerio utiliza la investigación científica al formular estas políticas y tiene en cuenta los costos relacionados con el deterioro ambiental. Además, el ministerio utiliza instrumentos económicos para prevenir, corregir y restaurar el daño ambiental. El objetivo es que estas políticas sean implementadas por empresas estatales que incluyan como práctica estándar los costos relacionados con el deterioro ambiental.

Resolución de UPME 703 del 2018: Define los procedimientos y requisitos para la emisión de certificados de beneficio ambiental para nuevas inversiones y gestión energéticamente eficiente de proyectos de energías renovables no convencionales con el objetivo de obtener los beneficios fiscales de la Ley 1715 (*Ministerio de Minas y Energía, s/f*)

En el Plan nacional de desarrollo 2018-2022, se han establecido diversas leyes relacionadas con el desarrollo social, económico, cultural y productivo con un enfoque de equidad. En estos acuerdos se enfatiza la implementación de fuentes de energía no convencionales, así como la importancia de la minería de los recursos energéticos y la calidad y eficiencia de los servicios públicos

A través de la resolución 754 de 2014 Se utilizaron enfoques para desarrollar, implementar, evaluar, monitorear, controlar y actualizar planes integrados de manejo de residuos sólidos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Vivienda, Ciudades y Territorios, 2014).

El decreto 298 fue elaborado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2016 para establecer el funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático, el cual menciona el aprovechamiento de residuos sólidos para generar biogás.



7.5. Salud y seguridad

Algunos de las principales afectaciones en la salud y seguridad al usar un biodigestor son el riesgo de explosión del biogás, así como los asociados a la contaminación por medio de una fuga de los desechos orgánicos contenidos en este, y la propagación de patógenos, lo que puede llegar a ser peligroso para sus usuarios y el medio ambiente que lo rodea. Por esto se exponen una serie de medidas de seguridad que reducen ambos riesgos casi en su totalidad.

7.5.1. Riesgo de explosión:

Es fundamental controlar la presión interna en todo el sistema, tanto el biodigestor, como el circuito de biogás, para esto se debe instalar un manómetro que permite conocer la presión instantánea.

La causante de explosión es la combinación del biogás generado y oxígeno dentro de un espacio confinado. el rango de presión interna admitida deberá ser entre un valor ligeramente por encima de la presión atmosférica lo cual equivale a aproximadamente 1,020 atmósferas y hasta 1,5 atmósferas aproximadamente para evitar ta-nto bajas presiones, que pueden dificultar su extracción, y si esta es demasiado baja puede generar una depresión que, en caso de una fuga, permitiría el ingreso de oxígeno, lo que estaría exponiendo el sistema a un alto riesgos de explosión, por otro lado altas presiones, pueden hacer ceder el medio en el que este está contenido.

El biodigestor es un recipiente estanco, por lo que el valor mínimo de presión mencionado se consigue a medida que se genera biogás. Para evitar que la presión suba por encima del valor máximo recomendado, se incluye un sistema de despresurización que libera gas a la atmosfera en caso de que la presión en el biodigestor aumente por encima del rango establecido. El circuito que conduce el biogás generado a un quemador final para su aprovechamiento como energía térmica,



lleva instalado dos válvulas de llama antirretorno homologadas para evitar así mismo la entrada de aire mientras la llama esté encendida (Medialab-Matadero Madrid, s/f)

7.5.2. Riesgo de fuga de residuo orgánico:

Este riesgo está asociado a las posibles fugas de material orgánico que se encuentra en el interior del digestor durante el proceso de fermentación, teniendo en cuenta un posible riesgo de contaminación de aguas subterráneas y suelos fértiles suelos.

Esto debe tenerse en cuenta en el diseño y previa instalación del digestor disponiendo de un sistema de recogida de estas posibles fugas evitando que atraviesen a las capas del suelo.

Propagación de patógenos. Los parámetros más críticos para la inactivación de patógenos son la temperatura en combinación con el tiempo, el tratamiento para la reducción de patógenos potenciales en el lodo digerido es solo una de varias barreras para la transmisión de enfermedades. Las enfermedades zoonóticas deben controlarse antes del uso de los lodos digeridos, ya que, de lo contrario, habría riesgos de transmisión de enfermedades ya sea a animales domésticos o personas circundantes.

Los microorganismos siempre estarán presentes en el gas producido pero el riesgo al usar el biogás mejorado es bajo, otra medida de seguridad adicional es utilizar un filtro de partículas similar al que se utiliza para la eliminación de partículas antes de su uso como combustible para automóviles

8. Metodología para la selección y desarrollo de la solución

8.1. Soluciones ilógicas

Se podrían considerar como soluciones ilógicas a las que, al presentarse un tipo de problema, se espere que se solucione sin hacer ninguna modificación al uso que se le está dando, como por ejemplo si se presenta ya sea una falta de producción de CH₄, disminución de población



de microorganismos, o sobrealimentación, si se siguen teniendo las mismas practicas no va a haber solución alguna de los problemas puede hasta llegar a dejar el biodigestor inutilizable, o llegar a causar un accidente.

8.2. Comparar con hechos conocidos

Si se presenta sobrealimentación del biodigestor esto se puede identificar por disminución en la producción de biogás al revisar la altura del gasómetro, acidificación de contenido de digestión cuando la medición de pH inferior a 6. y dificultad para mover el mezclado, Para corregir este problema Suspender la alimentación por al menos 1 semana, mientras se controla la producción de biogás y el pH, y se verifica que ambos aumenten. En caso de observar demasiado espeso el interior del biodigestor agregar agua y mezclar el biodigestor con el fin de diluir el material que se está biodegradando.

Si al fin de la semana, el pH ha recuperado el valor de 7, retomar la alimentación con $\frac{1}{4}$ del valor diario de diseño. Si continúa esta situación, hacer recambio de $\frac{1}{4}$ del contenido del biodigestor con inóculo nuevo, es decir, cargar con 4 baldes de 10 litros de estiércol vacuno 12 y 90 litros de agua 13. Luego de esto, mantener sin alimentación el biodigestor durante 1 semana, controlando pH y producción de biogás. Si al final de la misma, el pH se mantiene o llega a valores admisibles (por encima de 7), continuar con el uso normal.

Si se presenta disminución de producción de biogas sin cambio significativo en el pH, las posibles causas pueden ser; antibióticos en alimentación, muerte de la población de microorganismos. o disminución de la actividad microbiana por bajas temperaturas. Para corregir este problema se recomienda vaciar el biodigestor e iniciar la puesta en Marcha desde el inicio. Disminuir la alimentación a la mitad del valor de diseño, mientras se controla el pH. En caso de



notarse una disminución del mismo, suspender la misma por una semana y luego retomar con una cantidad aún menor, por ejemplo, $\frac{1}{4}$ de la cantidad de diseño.

Si la llama de hornalla o quemador no enciende o se apaga fácilmente, es un indicio de disminución de niveles de CH₄ en el biogas, para arreglar este problema se recomienda alimentar con 1 taza de azúcar o 2 tazas de sorgo molido o maíz molido¹⁵ durante 1 semana, luego retomar la alimentación de diseño gradualmente, esto es: durante 3 semanas ir disminuyendo día a día la cantidad de azúcar o sorgo al tiempo que se aumenta la del sustrato final y así hasta llegar a 5 baldes de este sin agregado de azúcar y retomar la operación habitual. Esta una situación que no debería presentarse si no se ha alterado abruptamente la alimentación.

8.3. Evaluación de las soluciones

Debido al alto costo de los fertilizantes químicos y la disponibilidad limitada de recursos energéticos en las comunidades rurales, muchas personas ven la biodigestión como una solución alternativa a la contaminación. Además, algunos creen que la tecnología de biodigestión podría proporcionar un reemplazo adecuado para los fertilizantes químicos.

9. Análisis de costos

9.1. Análisis económico

El establecimiento de procesos de digestión anaeróbica se enmarca en una dinámica de economía circular que permite brindar tres servicios simultáneamente:

- 9.1.1. Tratar los residuos
- 9.1.2. Proporcionar energía (biogás)
- 9.1.3. Producir fertilizantes (digestatos)

Luego, el biogás se puede purificar en biometano para inyectarlo en la red de gas.



Al complementar la importación de gas natural, esta producción territorial de biometano es una palanca potencial para la transición energética que es uno de los objetivos que actualmente tiene el gobierno el Colombia.

9.2. Análisis de costos

La estimación concreta de los costos de un proyecto para la generación de biogás mediante digestión anaeróbica puede resultar compleja. Depende de varios factores específicos del proyecto, como su tamaño, su ubicación, el tipo de insumos o la tecnología elegida. Ya que es un proyecto de inversión puesto que el único costo es la compra de materiales de obra civil para acoplar el lugar y los equipos tecnológicos para la producción de biogás y energía.

El costo de la producción de energía varía según la cantidad de vacas que se encuentren en la granja puesto que esto da un valor considerado del estiércol que se va a tartar en el biodigestor, a continuación, se realiza un análisis para una granja lechera de 15 vacas cuya inversión debe ser de \$26.055.300,00 de pesos colombianos este estimado para poder suministrar electricidad a alrededor de 54176 kWh por año como se muestra en la tabla 3 y 4

Tabla 3. Análisis de costos

ANÁLISIS DE COSTOS				
ACTIVOS	CANTIDAD	VIDA UTIL	COSTO	COSTO TOTAL
Maquinaria y equipo				
Obra civil		50 años	\$ 500.000,00	\$ 500.000,00
Tanque de 1000 L	2	30 años	\$ 545.900,00	\$ 1.091.800,00
Tubo 2x6m	10	50 años	\$ 108.900,00	\$ 1.089.000,00
Generador eléctrico a biogás	5	3 años	\$ 4.650.900,00	\$ 23.254.500,00
TOTAL				\$ 25.935.300,00
GATOS	CANTIDAD	VIDA UTIL	COSTO	COSTO TOTAL
Mantenimiento	2	2 veces por año	60000	120000
TOTAL INVERSIÓN				\$ 26.055.300,00

Fuente: Elaboración propia



La tabla 4 permite evidenciar la cantidad de energía y biogas que se puede producir según la cantidad de toneladas de estiércol generadas por el número de vacas, además de esto la cantidad de fertilizante orgánico y compost que se genera

Tabla 4. Análisis de producción

PRODUCCIÓN ELECTRICIDAD/BIOGAS									
DATOS BASICOS			BIOGAS		ELECTRICIDAD		FERTILIZANTE/COMPOST		COMPENSA CIÓN DE CO2
Canti dad de vacas	Sustrato	Ton Sustrato/ año	Biog ás [m3]	Suminis tro para hogares	Electrici dad (kWh por año)	Suminis tro para hogares	Fertilizant e orgánico [Ton/año]	Compo st [Ton/a ño]	CO2 POR AÑO
1	Estiércol Vaca	23	950	1	3612	1	22	9	2
15	Estiércol Vaca	339	1425	12	54176	18	333	136	34
35	Estiércol Vaca	792	3326	28	126411	42	776	317	80
45	Estiércol Vaca	1018	4277	36	162529	54	998	407	102
60	Estiércol Vaca	1358	5702	48	216705	72	1331	543	137

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la tabla 5 muestra el valor que se puede obtener por la venta de compost ya que en Colombia hoy en día 1Kg de compost tiene un valor comercial de 5950 pesos, pero al realizar dicho valor no se tuvo en cuenta en valor del empaquetado por tal razón se calculó con un valor de 4500 para dejar el valor restante para el empaquetado



Tabla 5. Análisis de producción del compostaje

VENTA DE COMPOSTAJE				
Cantidad de vacas	Sustrato	Ton Sustrato/año	Compost [Ton/año]	Ganancia venta de compostaje anual
1	Estiércol Vaca	23	9	\$ 36.953.307
15	Estiércol Vaca	339	136	\$ 554.299.607
35	Estiércol Vaca	792	317	\$ 1.293.365.750
45	Estiércol Vaca	1018	407	\$ 1.662.898.822
60	Estiércol Vaca	1358	543	\$ 2.217.198.429

Fuente: Elaboración propia

10. Prototipo

Se realizó un prototipo en 3D en la aplicación Brick Building de la planta de biogás, ya que brinda acceso a amplias posibilidades de diseño y técnicas eficientes para ahorrar tiempo y dinero. Además, que permite conceptualizar las ideas de una manera más dinámica para, ya sea el cliente o un posible inversor pueda entender la idea más fácilmente sin ningún costo adicional.

Figura 3. Planta de biogás



Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Planta de biogás



Fuente: Elaboración propia

11. Conclusiones

Como fuente de energía renovable, el biogás tiene características únicas y se puede utilizar de muchas maneras. El biogás puede: producir energía confiable y flexible 24/7.

El biogás contrae beneficios económicos, sociales y ambientales, tiene beneficios para la economía verde que son considerables e incluyen: desarrollo económico generando fuertes inversiones en las comunidades rurales y la creación de subproductos útiles a partir de residuos, actuando como un importante multiplicador económico ya que se obtienen fertilizantes y compost. En cuanto a la parte ambiental los beneficios son números puesto que se realiza la captura y uso del metano, un gas de efecto invernadero 21 veces peor que el CO₂, también convertir los flujos de desechos densos en energía en combustible y desviarlos de los vertederos y eliminar los compuestos que causan olor. Así mismo en su defecto al ser combustionado este gas ya sea para



la generación de energía eléctrica o para gas natural en la cocina, esta combustión da como resultado $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, así en vez de liberarse metano a la atmósfera se libera dióxido de carbono el cual es menos contaminante.

12. Referencias

- Arellano, L., Dorado, A., Gamisans, X., Lafuente, J., & Monroy, O. (2017). *Purificación y usos del biogás./Purification and use of biogas*.
https://www.researchgate.net/publication/316656176_Purificacion_y_usos_del_biogasPurification_and_use_of_biogas
- Biodigestores a escala para el tratamiento de residuos orgánicos | Medialab-Matadero Madrid*. (s/f). Recuperado el 26 de septiembre de 2022, a partir de <https://www.medialab-matadero.es/proyectos/39086/description>
- Conesa, V., & Conesa, L. (2011). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental - CONESA FERNANDEZ-VITORIA, VICENTE* - Google Libros.
<https://books.google.com.co/books?id=wa4SAQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Corona Zuñiga, I. (2017). *Biodigestores*.
<http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/362/Biodigestores.pdf?sequence=1>
- Demirbas, A. H., & Demirbas, I. (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management*, 48(8), 2386–2398.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2007.03.005>



FAO. (2021). *Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta.*

Catálogo de Publicaciones de La FAO 2021; FAO. <https://doi.org/10.4060/CB4740ES>

Hofmann, N., & Beaulieu, M. (2001). *A Geographical Profile of Manure Production in Canada, 2001 - ARCHIVED.* <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/21-601-m/21-601-m2006077-eng.pdf>

Mallikarachchi, M. (2020). *What is a Biodigester? - Green Business Bureau.* <https://greenbusinessbureau.com/blog/what-is-a-biodigester/>

Martín, J., Santos, J. L., Aparicio, I., & Alonso, E. (2015). Pharmaceutically active compounds in sludge stabilization treatments: anaerobic and aerobic digestion, wastewater stabilization ponds and composting. *The Science of the Total Environment*, 503–504, 97–104. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.05.089>

Ministerio de Minas y Energía. (s/f). Recuperado el 26 de septiembre de 2022, a partir de <https://www.minenergia.gov.co/es/>

Tobon Abello, A. (2018). *Análisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cúpula flotante en las zonas rurales y urbanas de la región norte de Colombia.*

UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.* http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Manual de uso del biodigestor. (2019, septiembre). Gobierno de Santa Fe. Recuperado 24 de septiembre de 2022, de <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/09/Manual-de-uso-de-biodigestores-10001.pdf>



- Vega, J. P. (2018). *La industria del sector lácteo aporta 24,3% del Producto Interno Bruto agropecuario*. <https://www.larepublica.co/economia/la-industria-del-sector-lacteo-aporta-24-3-del-producto-interno-bruto-agropecuario-2733713>
- Vinnerås, B. & Schönning, C. (2011). Microbial Risks Associated with Biogas and Biodigester Sludge. *Encyclopedia of Environmental Health*. Recuperado 25 de septiembre de 2022, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444639516005441?via%3Dihub>
- Yousuf, A., Karim, A., Islam, M. A., Karim, S. U., Khan, M. M. R., & Faizal, C. K. M. (2020). Dry fermenters for biogas production. En *Bioreactors: Sustainable Design and Industrial Applications in Mitigation of GHG Emissions*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00006-1>
- Uso correcto del Biodigester. (2020, 28 mayo). Tecnotanques. Tanques y Cisternas. Recuperado 25 de septiembre de 2022, de <https://tecnotanques.com/uso-correcto-del-biodigester/>