

**IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR RURAL PARA LA DIGESTIÓN
ANAEROBIA DE ESTIERCOL BOVINO EN LA FINCA MARCELLA**

LAURA MARCELA MANTILLA AVILA

GUSTAVO ANDRES ROJAS AMAYA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

**IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR RURAL PARA LA DIGESTIÓN
ANAEROBIA DE ESTIERCOL BOVINO EN LA FINCA MARCELLA**

LAURA MARCELA MANTILLA AVILA

GUSTAVO ANDRES ROJAS AMAYA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero químico.

DIRECTORA

LILIANA CASTRO MOLANO

Ingeniera química, Ph.D.

CODIRECTOR

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero químico, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios, por permitirnos alcanzar esta meta y este sueño.

Al profesor Humberto Escalante, por su orientación y respaldo durante el desarrollo de este trabajo.

A la profesora Liliana Castro, por su paciencia, por su motivación y confianza, por las enseñanzas y por el tiempo brindado.

A los doctores Lylian Rodríguez y Jaime Martí, por compartir con nosotros sus conocimientos y hacernos parte de sus experiencias.

Al grupo de Digestión Anaerobia por ser el mejor equipo de trabajo.

A los colaboradores, Guillermo Acero y Don Eduardo.

Dedicatoria.

A Dios primeramente por darme las fuerzas y demostrarme su amor mediante este logro alcanzado.

A mi Madre por creer que si era posible, por sus oraciones y por ser la autora de gran parte de lo que soy hoy. Con sus enseñanzas, su carácter y su sencillez han inculcado en mí su espíritu guerrero y luchador. Por siempre estaré agradecido y feliz de que seas mi madre.

A mis hermanos, a mi padre y a mi sobrina por ser esa motivación especial para querer seguir adelante para nunca querer bajar los brazos para que un día como hoy pudiera decir lo logre. Y De esta manera decirles mis logros son y serán siempre para ustedes.

A mis demás familiares, a mis amigos y a quienes me brindaron su apoyo en el comienzo, en el transcurso y al final de esta etapa.

Gustavo

Dedicatoria.

A Dios por llenarme de sabiduría y permitirme alcanzar esta meta de la mejor manera.

A mi madre, quien con su confianza y amor me ha guiado por el mejor camino. Su paciencia y valentía son el motor de una familia.

*A mi padre, por su amor y su entusiasmo en cada una de las etapas de mi vida.
Por ser el apoyo de sus hijos.*

A mi hermano, por su compañía siempre y por ser mi motivación para ser mejor cada día.

A mis demás familiares y a mis amigos quienes me han brindado su apoyo y su compañía a lo largo de este proceso.

Laura

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEORICO.....	20
1.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA	20
1.2. BIODIGESTORES DE BAJO COSTO (BDG)	22
2. METODOLOGÍA	26
2.1. INFORMACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	26
2.2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL BDG	26
2.2.1. Disponibilidad de la materia prima	26
2.2.2. Materiales para la construcción del sistema anaerobio.....	28
2.2.3. Determinación de los parámetros del BDG	29
2.3 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN UN BDG	31
2.3.1. Puesta en marcha y operación del reactor.....	31
2.3.2. Monitoreo del proceso de DA.....	31
2.4. MÉTODOS ANALÍTICOS	32
2.5. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS Y ECONÓMICAS	32
3. RESULTADOS	34
3.1. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL BDG	34
3.1.1. Disponibilidad de la materia prima	34
3.1.2. Parámetros de diseño del BDG.....	36
3.2. PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN UN BDG	37
3.2.1. Conversión de materia orgánica	37
3.2.2. Cinética de la etapa hidrolítica y acidogénica.	37

3.2.3.	Producción de biogás.....	38
3.2.4.	Estabilidad del reactor.....	39
3.2.5.	Producción de biogás a partir del estiércol bovino.	40
3.3.	CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS Y ECONÓMICAS	42
4.	CONCLUSIONES.....	43
	BIBLIOGRAFIA.....	44
	ANEXOS.....	50

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Etapas de la DA. Fuente: (Angelidaki et al., 2011).	20
Figura 2. Biodigestor de bajo costo. (Botero, 2011).....	23
Figura 3. Construcción e instalación del BDG.....	30
Figura 4. PBM experimental.....	36
Figura 5. Biodigestor construido e instalado.	36
Figura 6. Conversión de materia orgánica	37
Figura 7. Etapa hidrolítica y acidogénica	38
Figura 8. Producción de biogás.	39
Figura 9. Estabilidad del proceso.....	40

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Condiciones de operación.....	31
Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del afluente.....	34
Tabla 3. PBM teórico del estiércol bovino fresco.....	35
Tabla 4. Especificaciones del biodigestor.....	36
Tabla 5. Rendimientos de biodigestores.....	41
Tabla 6. Consideraciones energéticas.....	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Método de desplazamiento alcalino.....	50
Anexo B. Cálculo del PBM teórico.....	52
Anexo C. Cotización materiales.....	53
Anexo D. Instalación paso a paso del biodigestor.....	54
Anexo E. Registro fotográfico.....	59

NOMENCLATURA

AGV	Acidos grasos volátiles
ART	Azúcares reductores totales
AT	Alcalinidad total
BDG	Biodigestores de bajo costo
DA	Digestión anaerobia
DQOs	Demanda química de oxígeno soluble
EB	Estiércol bovino
PBB	Producción de biogás por bovino
PBM	Potencial de biometanización
PEB	Producción específica de biogás
SV	Sólidos volátiles
TRH	Tiempo de retención hidráulico
TRS	Tiempo de retención de sólidos
VCO	Volumen de carga orgánica
VPB	Volumen de producción de biogás

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACION DE UN REACTOR RURAL PARA LA DIGESTION ANAEROBIA DE ESTIERCOL BOVINO EN LA FINCA MARCELLA*.

AUTORES: LAURA MARCELA MANTILLA AVILA, GUSTAVO ANDRES ROJAS AMAYA*.

PALABRAS CLAVE: Estiércol, Afluente, Digerido, Biodigestor, Valorización

CONTENIDO: El estiércol bovino producido en la actividad ganadera es el mayor residuo renovable producido en los agroecosistemas. La estabilización de la materia orgánica presente en el estiércol bovino y la valorización energética de este se ha logrado mediante la digestión anaerobia. En el desarrollo de esta investigación se implementó un reactor rural o biodigestor de bajo costo para la digestión anaerobia (DA) de estiércol bovino. El cual se diseñó, construyó e instaló para la producción de biogás y obtención de un digerido utilizado como fertilizante. Previo a la puesta en marcha del biodigestor se realizaron una caracterización fisicoquímica y el cálculo de los potenciales de biometanización teórico y experimental del afluente a utilizar durante el proceso. Seguidamente durante la operación del biodigestor se monitorearon el consumo de azúcares reductores totales (ART), la conversión de materia orgánica en términos de demanda química de oxígeno soluble (DQOs) y de sólidos volátiles (SV), la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), la estabilidad del proceso (PH-AT) y la producción de biogás. Para la digestión anaerobia de estiércol diluido en agua en relación 1:3 se obtuvo que la producción de biogás obtenida fue de 0,9 m³/día y que la valorización energética del estiércol produjo un % de ahorro energético del 76% y un ahorro económico de 40.300 \$/mes.

* Trabajo de grado

* Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química. Directora Liliana Castro Ing. Química Ph.D. Co-director Humberto Escalante Ing. Químico Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF RURAL REACTOR FOR ANAEROBIC DIGESTION OF BOVINE MANURE IN MARCELLA FARM.*

AUTHORS: LAURA MARCELA MANTILLA AVILA, GUSTAVO ANDRES ROJAS AMAYA**.

KEYWORDS: Manure, Tributary, Digested, Biodigester, Recovery

CONTENT: Bovine manure produced in livestock activity is the largest renewable waste produced in agro-ecosystems. Stabilization of organic matter present in the bovine manure and energy recovery of this has been achieved by anaerobic digestion. In the development of this research a rural reactor or low-cost digester for anaerobic digestion (AD) of bovine manure was implemented. Which it was designed, built and installed for the production of biogas and obtaining a digested used as fertilizer. Prior to implementation of the digester a physic-chemical characterization and calculation of theoretical and experimental biomethanisation potential of tributary to use during the process were performed. Then during operation of the biodigester consumption of total reducing sugars (TRS) were monitored, conversion of organic matter in terms of chemical demand of soluble oxygen (COD's) and volatile solids (VS), the concentration of volatile fatty acids (VFA), the stability of the process (PH-AT) and biogas production. For anaerobic digestion of manure diluted with water in 1: 3 ratio was obtained that biogas production was 0.9 m³/day and energy recovery of manure produced a % of energy savings of 76% and cost savings of \$ 40,300 / month.

* Degree Work

** Faculty of Engineering Physic-chemical. School of Chemical Engineering. Director Liliana Castro Chemical Engineer Ph.D. Co-director Humberto Escalante Chemical Engineer Ph.D.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, el 52% del país corresponde a zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional (SIN), esto debido principalmente a la geografía, su difícil acceso, problemas de orden público que puedan poner en riesgo la realización de un proyecto de interconexión, o también que por la baja cantidad de población que habita una región no sea viable hacer este tipo de proyectos. Según el más reciente informe de la cartera de minas, el 3,33% de la población del país vive en zonas rurales que no cuentan con interconexión al servicio de gas natural (Ministerio de Minas y Energía, 2016). Lo anterior, hace que surja la necesidad de buscar alternativas tecnológicas con recursos renovables. (Hernández y Castro, 2010).

Por otra parte, el sector agropecuario para el año 2015 representó el 2,9% del PIB del país, con una participación de la ganadería del 11,8% (SAC, 2015). Los departamentos con mayor producción bovino son Antioquía, Bogotá y Santander (DANE, 2016). El ganado bovino, genera diariamente alrededor de 8 kg de estiércol/100kg de peso por cabeza de ganado (Martí, 2008), siendo el mayor residuo renovable producido en los agroecosistemas. La incorrecta disposición de este estiércol, puede generar problemas de malos olores, atracción de vectores y producción de nitratos. (Lohuis, 1990).

Una alternativa para la estabilización de la materia orgánica presente en el estiércol bovino (EB), es la digestión anaerobia (DA), dado que este residuo se caracteriza por tener humedades entre 71,09 y 88,96 % p/p, materia volátil entre 36,82y 72,41% p/p, materia orgánica entre 60,81 y 76,75% y relación C/N entre 13,69 y 32,44%. La biomasa residual bovina, depende de factores intrínsecos al animal como son la fisiología digestiva, la composición de la dieta, la etapa de crecimiento, y el sistema de manejo. (Escalante, *et al.*, 2010).

La DA tiene triple beneficio: a) se produce un biogás como fuente de energía renovable; b) reduce los problemas de contaminación causados por el estiércol y c) produce un digerido (fertilizante orgánico) que permite el reciclaje de nutrientes en la tierra. De acuerdo a lo anterior, la DA se ha posicionado como un proceso de producción de energía renovable en zonas rurales no interconectadas. Este proceso se lleva a cabo en reactores tubulares denominados biodigestores de bajo costo (BDG). La referencia al bajo costo es debido a que la construcción es con mangas de polietileno tubular, baja inversión económica en materiales y fácil instalación.

Los BDG presentan beneficios técnicos, económicos y ambientales, por lo cual se han convertido en una solución para suplir las necesidades energéticas de las zonas no interconectadas, además de estabilizar la materia orgánica presente en el estiércol bovino. Se estima que en Colombia hay más de 120 digestores de bajo costo, en zonas rurales no interconectadas (Garfí *et al.*, 2016). Sin embargo, la sostenibilidad de la tecnología es inviable porque no se realiza seguimiento a estos reactores, lo que consecuentemente se traduce en el abandono del digestor (Fotidis, *et al.*, 2016). Por lo anterior, es necesario realizar seguimiento a la operación anaerobia después de instalado el reactor.

Particularmente, el desarrollo de este trabajo se enfoca en la finca Marcella, ubicada en la zona rural de Girón, Santander a 9 km del casco urbano. Esta finca carece de suministro de gas natural debido a que se encuentra en una zona de difícil acceso con presencia de caminos interveredales terciarios. Para acceder al servicio de gas, los habitantes de la finca deben desplazarse hasta el casco urbano, lo cual representa costos de transporte, incomodidades por no contar con un suministro continuo de gas, lo cual reduce la calidad de vida de las personas de la finca Marcella.

Con relación a las actividades agropecuarias, la finca tiene una extensión aproximada de 9 Ha, donde se encuentra un cultivo de 1500 plantas de cacao y tres cabezas de ganado bovino raza Normando, que producen diariamente estiércol, que puede ser estabilizado y valorizado energéticamente. Teniendo en cuenta lo anterior, los objetivos de este trabajo de investigación fueron diseñar y construir un biodigestor de bajo costo en la finca Marcella y evaluar el comportamiento de la digestión anaerobia del biodigestor de bajo costo.

1. MARCO TEORICO

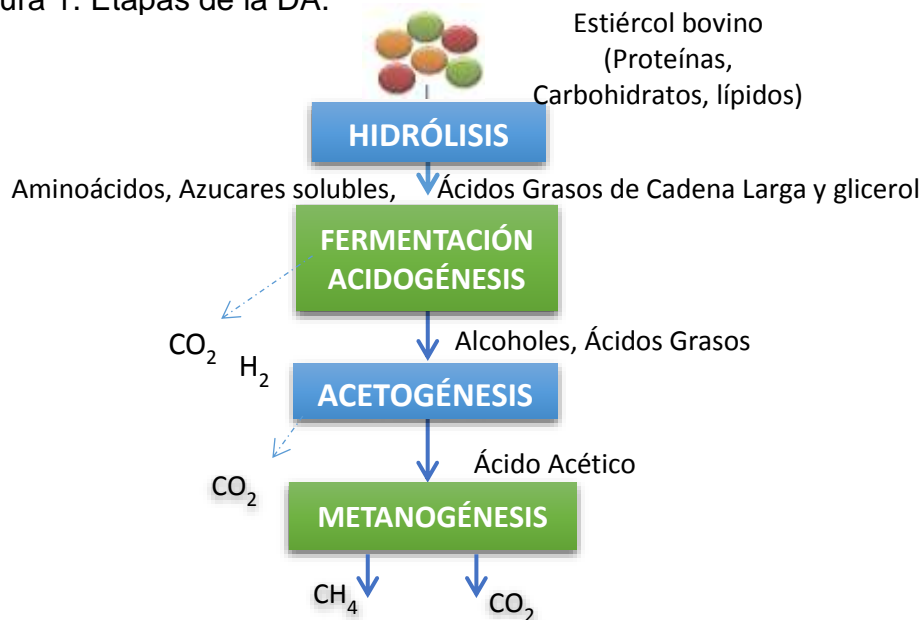
1.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La DA es una reacción bioquímica compleja que se lleva a cabo en un entorno libre de oxígeno por varios tipos de microorganismos (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991) donde las bacterias descomponen la materia orgánica para producir biogás y un líquido (digerido).

Se puede producir diariamente un volumen de biogás entre el 15% y 30%, con relación al volumen de la fase líquida total. Este biogás alcanza un contenido de entre 60 a 70% de metano, que es un combustible renovable, apto para su uso directo y sin presión (Botero, 2011). El digerido tiene alto contenido de macro y micronutrientes siendo una alternativa de nutrientes para los terrenos de cultivo.

La DA se lleva a cabo en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, y metanogénesis. (Figura 1).

Figura 1. Etapas de la DA.



Fuente: (Angelidaki et al., 2011).

La hidrólisis es la descomposición de sustrato orgánico en productos más pequeños que posteriormente son absorbidos y degradados por las bacterias. (Morgenroth *et al.*, 2002). En esta etapa intervienen las bacterias hidrolíticas, que producen ácido acético, compuestos mono carbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonatos. Las cadenas de carbohidratos se transforman en azúcares simples, las grasas en ácidos grasos y glicerol y las proteínas se hidrolizan hasta péptidos y aminoácidos, liberando dióxido de carbono e hidrogeno. (Castro 2012).

En la acidogénesis los productos solubles de la hidrólisis son transformados en ácidos grasos volátiles (AGV) de cadena corta y alcoholes por acción de una amplia gama de microorganismos (Angelidaki *et al.*, 2011). En la etapa de acetogénesis se sintetiza acetato por la reducción de CO_2 y ácidos orgánicos. En este proceso actúan microorganismos homoacetanogénicos que consumen H_2 y CO_2 , y produce acetato (Angelidaki *et al.*, 2011). Por último en la fase de metanogénesis, el acetato, H_2 y CO_2 se transforman en CH_4 y CO_2 , por acción de las bacterias metanogénicas. (Deppenmeier, 2002).

El pH es una de las variables que determinan la estabilidad en el proceso. Se ha demostrado que el rango óptimo de pH para obtener máxima producción de biogás en la digestión anaerobia es 6,5 a 8 (Poh y Chong, 2009). En cuanto al arranque del proceso de DA, este está fuertemente relacionado con la concentración de azúcares reductores totales (ART), a una alta concentración se favorece el arranque y el buen funcionamiento del biorreactor. Los ART son compuestos solubles que son fácilmente metabolizados por los microorganismos, permitiendo llevar a cabo las etapas de la DA (Madigan *et al.*, 2006).

Los AGV son el resultado de la fase de acidogénesis y son principalmente ácido acético, propiónico y butírico (Pandey *et al.*, 2011) y la alcalinidad total (AT) es la capacidad que posee el sistema para amortiguar la presencia de ácidos sin disminuir el pH.

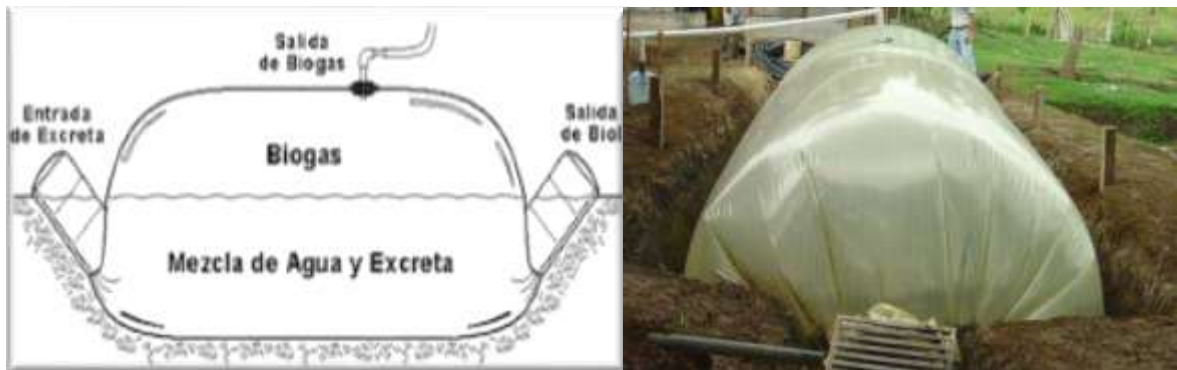
Además cabe resaltar que la DA puede ser llevada a cabo en tres intervalos: menos de 30°C (proceso psicrófilico), 30-40°C (proceso mesófilico) y de 50-60°C (proceso termófilico). Sin embargo el rango en el que los microorganismos anaeróbicos son más activos es en el intervalo de temperatura mesófilico.

1.2. BIODIGESTORES DE BAJO COSTO (BDG)

Un biodigestor es un sistema natural que aprovecha la DA de las bacterias que ya habitan el estiércol, para transformarlo en biogás que puede ser empleado como combustible en las cocinas, calefacción o iluminación (Martí, 2008). La producción de biogás no es una constante, sino que es una variable que viene dada por el tiempo de retención hidráulico (TRH), estimado según la temperatura en el sitio de instalación del biodigestor.

Los biodigestores tubulares de bajo costo, constan principalmente de una bolsa de polietileno o geomembrana que almacena la materia orgánica y en la cual se realiza la digestión anaerobia (Figura 2). La entrada y la salida del biodigestor se realizan mediante dos tubos de material PVC amarrados a la bolsa con tiras de neumático reutilizado. El sistema de seguridad consta de una botella plástica de aproximadamente 13 cm de profundidad insertada al tubo de salida de biogás; cuando la presión del biodigestor es mayor a la del agua será liberado el biogás. Para el almacenamiento del biogás producido se usa un reservorio tubular del mismo material del biodigestor.

Figura 2. Biodigestor de bajo costo.



Fuente: Botero, 2011

Los BDG se construyen semienterrados en una zanja de dimensiones específicas para el perímetro del plástico usado y se les adapta un arreglo tipo invernadero con el fin de aprovechar la energía solar, la cual contribuye a que el reactor mantenga la temperatura en el rango mesofílico. Adicional a esto, los biodigestores cuentan con un sistema de agitación manual el cual consiste en un lazo con un arreglo de tapas distribuidas a lo largo de la sección transversal del reactor. De esta manera, los biodigestores de bajo costo no requieren otras fuentes energéticas para calentamiento y/o agitación.

La instalación de biodigestores familiares ha mejorado la economía y el bienestar familiar en las áreas rurales. Los resultados de varios estudios indican que el uso de biodigestores reduce la pobreza energética, dado que se disminuye el gasto en la compra de combustibles y fertilizantes agrícolas. Además, los BDG causan un impacto positivo en el aspecto social debido a que la salud de la familia se mejora, reduciendo malestares y enfermedades causados por la quema de leña para cocinar. Por último, el medio ambiente se beneficia, gracias al tratamiento de residuos orgánicos, la disminución de la deforestación y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Botero, 2011).

Desde el punto de vista económico, los costos para la construcción de BDG varían dependiendo del diseño, la disponibilidad de los materiales, el tamaño y la ubicación. Estos costos en América Latina están entre 100 y 700 dólares. Cuando se utiliza polietileno de baja densidad el costo va desde 100 a 200 dólares (excluyendo mano de obra e instrumentación). Para los casos en que se utiliza polietileno de alta densidad o geo membrana los costos se elevan de 500 a 700 dólares (Garfí *et al.*, 2016).

A nivel mundial, se encuentran diferentes clases de digestores para tratar el estiércol bovino. Los digestores industrializados son por lo general reactores continuos de tanque agitado (CSTR), en el que una parte del biogás producido es utilizado para calentar y mezclar el digestor (Berglund y Börjesson, 2006). Esta tecnología no ha demostrado ser práctica o económica para los países en desarrollo (Inglis, 2006).

Los digestores domésticos generalmente son de cúpula móvil, cúpula fija y tubular. El reactor cúpula móvil consta de una campana que sube y baja dependiendo del volumen de biogás producido, que a su vez sirve como sistema de almacenamiento para este biogás. El reactor cúpula fija consiste en una cámara cerrada con un techo semiesférico y de paredes rectas, guardándose el gas producido durante la digestión bajo el domo, que a su vez distribuye la presión en una mayor área.

La selección del tipo de reactor depende de tres factores: en primer lugar, el costo de los materiales para la construcción del reactor tubular (polietileno) es mucho más bajo comercialmente que el concreto y ladrillos, además que la dificultad del transporte de los materiales al sitio de instalación es mucho menor en el caso del reactor tubular. Otro factor es que la construcción de los reactores tipo domo

requiere mayor profundidad lo que conlleva más trabajo en la adecuación del sitio de instalación. Por último, el reactor tubular al encontrarse semienterrado es de fácil adaptación a climas fríos debido a que se aprovecha el calor generado por el sol. De acuerdo a lo anterior, los BDG presentan mayores beneficios para ser implementados en áreas rurales.

2. METODOLOGÍA

2.1. INFORMACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La Finca Marcella, se encuentra ubicada en la zona rural municipio de Girón, Colombia, a 9 km del casco urbano. El clima de esta región es tropical y se encuentra a una altura de 959 m.s.n.m, (Lat. N 7°01' 0,07" Long. W 73°08'13,3"), con una temperatura entre 23°C y 32°C. Esta región tiene caminos terciarios que limitan el suministro de gas natural. La finca cuenta con 3 cabezas de ganado bovino Normando, que tienen un peso promedio de 210 kg.

2.2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL BDG

2.2.1. Disponibilidad de la materia prima

Determinación y caracterización del caudal de entrada

La práctica de la ganadería en la finca consiste en que los 3 bovinos de pastoreo tienen un periodo diario de alimentación de 8 horas, permaneciendo tabuladas 16 horas del día. El establo tiene unas dimensiones de 6 m de ancho y 5 m de largo. El estiércol producido en el establo fue recolectado y pesado diariamente durante un mes. Los resultados indicaron una mínima producción de estiércol de 34 kg y una máxima cantidad de 51 kg. El diseño del reactor se realizó con base a la máxima cantidad de estiércol generado.

Debido a que se trata de un proceso biológico, se requiere que el estiércol bovino este diluido con agua. De acuerdo a los parámetros de diseño esta dilución debe ser en una proporción 1:3 estiércol agua (Martí, 2008). El agua de dilución utilizada corresponde a aguas lluvias. La región donde se encuentra ubicada la

finca presenta un nivel de precipitaciones de 692 mm/a, lo cual permite recolectar aproximadamente 10 m³/mes de aguas lluvias. Teniendo en cuenta lo anterior, se calculó un caudal de entrada (Q) al reactor, al cual se le denominó afluente. A este afluente se le realizó una caracterización fisicoquímica en términos de demanda química de oxígeno soluble (DQOs), sólidos volátiles (SV), azúcares reductores totales, ácidos grasos volátiles, pH y AGV/AT.

Ensayo de biodegradabilidad anaerobia

Con el propósito de conocer la cantidad de metano producida por el afluente (potencial de biometanización PBM), se llevó a cabo una prueba de biodegradabilidad anaerobia de acuerdo con el protocolo establecido por Angelidaki *et al.*, 2009. Los experimentos se realizaron por triplicado en reactores *batch* de 50 mL (30 mL de volumen de trabajo) a temperatura de 34°C ± 2°C, durante 40 días.

El estiércol bovino es utilizado como fuente de sustrato e inóculo. Se estableció una proporción 1:3 estiércol agua de acuerdo a las condiciones de diseño. Todos los ensayos se gasearon con nitrógeno durante 2 minutos para garantizar condiciones de anaerobiosis y posteriormente fueron tapados con corchos de butilo y sellados con agrafes de aluminio. Los biorreactores fueron agitados manualmente 1 vez al día durante 2 minutos.

El volumen de metano producido diariamente se cuantificó por el método de desplazamiento alcalino con una solución 0,1N de NaOH con pH 12 y fenolftaleína como indicador (Anexo A). El PBM, se expresó en unidades de volumen de metano a condiciones de presión y temperatura estándar por la masa de SV de afluente adicionado (m³CH₄/kg SV_{afluente}).

Adicionalmente, se determinó el PBM teórico a partir de la composición química (C, H, O, N) del afluente, por medio de la ecuación de Buswell (Anexo B). El principal problema de esta fórmula es que la materia biodegradable y no biodegradable son tenidas en cuenta para el cálculo, mientras que sólo la primera se metaboliza en metano. Por lo tanto, el rendimiento de metano se sobreestima (Lesteur et al., 2011).

2.2.2. Materiales para la construcción del sistema anaerobio. Para la construcción del sistema anaerobio se requiere: tanque de mezcla, BDG, reservorio y accesorios.

a). Tanque de mezcla: Este tanque es utilizado para realizar la mezcla de estiércol bovino y agua en proporción 1:3. El tanque se diseñó en forma cubica. Las dimensiones del tanque se calcularon teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 40% sobre el caudal de afluente (Q). El tanque fue construido en ladrillo.

b). BDG: El cuerpo del reactor fue de polietileno tubular calibre 8 de 4 m de perímetro y protección UV (según especificaciones del mercado). Adicionalmente, se utilizó material reciclado (tiras de neumático para los amarres, tapas de plástico de 30 cm de diámetro y lazo de fique para el agitador, círculos plásticos y de neumático de 15 cm de diámetro usados como empaques en la salida del biogás y una botella de plástico de 3 L para el sistema de seguridad).

c). Reservorio: Para el almacenamiento del gas, se hizo un reservorio con el mismo material del cuerpo del BDG. El volumen del reservorio corresponde al 50% del volumen del biodigestor.

d). Accesorios: El biodigestor consta de 2 tubos de 4 in para la entrada (afluente) y

la salida (efluente) respectivamente. La salida del biogás y la tubería de conexión hacia el reservorio y la cocina se realizó con tubería de ½ pulgada. En el anexo C, se presenta una lista de materiales con especificaciones y costos.

2.2.3. Determinación de los parámetros del BDG

Tiempo de retención hidráulico

Para la determinación del tiempo de retención hidráulico se hizo una medición diaria de la temperatura ambiente local del lugar a donde se instaló el reactor, y con el valor mínimo reportado de 23°C se usó la tabla de tiempo de retención hidráulico en función de la temperatura ambiente reportada en Martí-Herrero (2008).

Volumen

El volumen de líquido es el producto de dos variables conocidas (Ecuación 1)

$$V_L = TRH \times Q \quad \text{Ecuación 1}$$

El volumen total debe albergar una parte líquida y otra gaseosa (Martí, 2008). Basados en la literatura el 75% del espacio se da a la fase líquida como se muestra en la ecuación 2, y el 25% restante a la fase gaseosa, correspondiendo a la campana de gas

$$V_L / 0,75 = V_T \quad \text{Ecuación 2}$$

A partir del volumen total se encuentran las dimensiones del biodigestor, considerando que es de forma cilíndrica (Ecuación 3). El diámetro depende del perímetro del rollo escogido, que en este caso es 4 m

$$L = V_T / \pi \cdot r^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Por último, la relación L/D es flexible en un rango de 5-10, siendo 7 la más recomendada (Martí, 2008).

2.2.4. Construcción e instalación del BDG. La instalación se realizó con base en las recomendaciones del *manual de instalación de biodigestores* de Rodríguez y Preston (Anexo D). La figura 3, presenta la síntesis del proceso de instalación del BDG.

Figura 3. Construcción e instalación del BDG.



2.3 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN UN BDG

2.3.1. Puesta en marcha y operación del reactor. En la tabla 1 se presentan las condiciones de operación establecidas para el arranque y operación del BDG.

Tabla 1. Condiciones de operación.

Parámetros	Fase I Puesta en marcha	Fase II Operación
Modo de operación	<i>batch</i>	Semicontinuo
Sustrato	EB	EB
Tiempo de operación	35 días	3 meses
Volumen de operación [m ³]	7,1	7,1
Velocidad de carga orgánica (VCO) [kg SV/ m ³ _{digestor} d]	0,3	0,7

2.3.2. Monitoreo del proceso de DA. Durante un periodo de 3 meses (Fase II operación), se tomaron muestras de afluente y efluente dos veces por semana para evaluar el proceso de DA. La degradación de la materia orgánica se estimó mediante la cuantificación de DQOs y SV.

El monitoreo de las etapas hidrolítica y acidogénica, se determinó midiendo la variación de ART y AGV. Las etapas acetogénica y metanogénica se valoraron por la producción de biogás. El volumen de gas producido se determinó mediante la lectura diaria de un medidor de flujo (contador de gas) marca Metrex® modelo G2.5. La estabilidad del proceso, se evaluó con la relación AGV/AT y pH. El porcentaje de metano y dióxido de carbono se midió por cromatografía de gases. Las especificaciones y rendimientos del proceso se presentan en términos de velocidad de carga orgánica [kg SV/m³_{digestor}d], velocidad de producción de biogás [m³_{biogás}/m³_{digestor}d], producción específica de biogás [m³_{biogás}/kg SV] y producción de biogás por bovino [m³_{biogás}/bovino*d].

2.4. MÉTODOS ANALÍTICOS

Los SV fueron medidos de acuerdo con los protocolos descritos por Standard Methods (Apha *et al.*, 2005). La DQO_s fue medida por el método calorimétrico por Apha *et al.*, 2005. Los ART se determinaron a partir del protocolo descrito por Miller, 1959. Los AGV y la AT fueron cuantificados por titulación de acuerdo al protocolo propuesto por Jobling *et al.*, 2014. El pH fue determinado usando un pHmetro metrohm 691. La cromatografía de gases fue realizada en el laboratorio de Cromatografía y Espectrofotometría de Masas- CROM MASS, de la Universidad Industrial de Santander, empleando la técnica *headspace* estático y análisis por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica y detector de ionización en llama (S-HS/GC/TCD/FID). El análisis cromatográfico se realizó en un cromatógrafo de gases (GC) AT 6890A.

2.5. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS Y ECONÓMICAS

Se calculó el poder calorífico inferior (PCI) del biogás por medio de la ecuación 4, para comparar su rendimiento con el del gas de cilindro (propano) (Energy, 2016)

$$PCI_{biogás} = PCI_{metano} \times \frac{\%metano}{100} \quad \text{Ecuación 4}$$

Adicionalmente, fue calculado el consumo de energía en la cocción de los alimentos de la finca con la ecuación 5, el suministro de energía del biogás con la ecuación 6, y el porcentaje de ahorro energético por medio de la ecuación 7

$$\text{Energía consumida} = PCI \times \text{flujo de gas propano} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{Energía suministrada} = PCI \times \text{flujo de biogás} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\% \text{ Ahorro de energético} = \frac{\text{energía suministrada por el biogás}}{\text{consumo de energía de finca}} \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Adicionalmente, a partir del costo del cilindro de gas propano se calculó el ahorro económico con la ecuación 8

$$\text{Ahorro económico} = \frac{\% \text{ Ahorro energético} \times \text{Costo de gas propano por mes}}{100} \quad \text{Ecuación 8}$$

3. RESULTADOS

3.1. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL BDG

3.1.1. Disponibilidad de la materia prima

Determinación y caracterización del caudal de entrada

El caudal de afluente (Q) es 0,204 m³/día, y su respectiva caracterización se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del afluente.

Variable	Unidades	Valor
DQOs	mg/L	6300
SV	g/kg	39,73
ART	mg/mL	0,141
AGV	mg/L	840
pH	---	7,56
AT	mgCaCO ₃ /L	1300

La materia orgánica disponible para la degradación, que se muestra en las concentraciones de SV y DQOs, permite identificar el afluente como una fuente de carbono disponible para la DA. La concentración de ART indica la presencia de materia orgánica soluble fácilmente degradable para el arranque del proceso.

Por otra parte las concentraciones de AGV y de AT descartan inhibición de la DA por acumulación de ácidos. El pH se encuentra en el rango adecuado para obtener máxima producción de biogás (Poh y Chong, 2009).

Ensayo de biodegradabilidad anaerobia

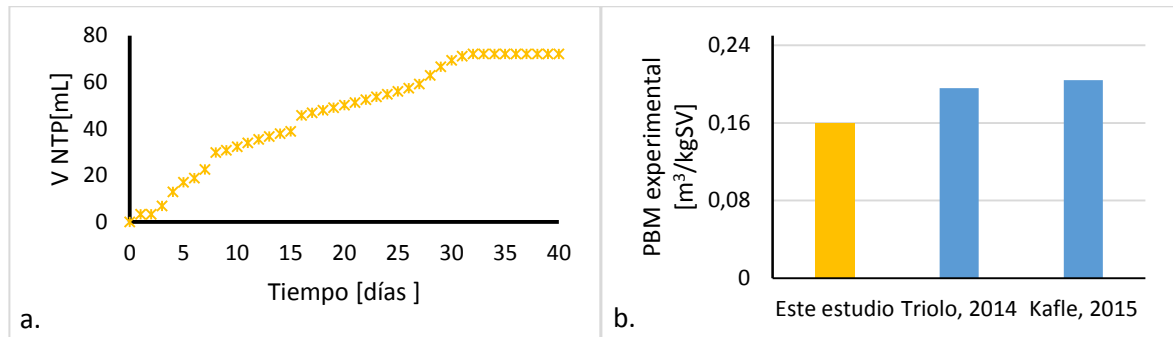
La Tabla 3, reporta %p/p de C, H, O, N y PBM teórico del estiércol bovino.

Tabla 3. PBM teórico del estiércol bovino fresco.

Variables	Unidades	Valor
C	% (g de C/100g)	38,89
H	% (g de H/100g)	4,78
O	% (g de O/100g)	33,5
N	% (g de N/100g)	1,44
C	moles/100g	3,24
H	moles/100g	4,78
O	moles/100g	2,09
N	moles/100g	0,102
Formula empírica		C ₃₂ H ₄₇ O ₂₀ N
PBM teórico (m ³ CH ₄ /kg SV)		0,503

La figura 4a, muestra el volumen acumulado de CH₄ durante los 40 días que fue realizado el ensayo de biodegradabilidad. Los potenciales de biometanización presentados en la figura 4b, muestran que el PBM en este estudio a 34°C está en el rango comparado con los reportados en la literatura para casos donde se trabaja con el mismo sustrato a 37°C. Se alcanza un buen rendimiento de producción de CH₄ evidenciando que el afluente es favorable para realizar la DA a gran escala.

Figura 4. PBM experimental. 4a. VNTP de metano. 4b. PBM de otros estudios.



3.1.2. Parámetros de diseño del BDG. En la tabla 4 se reportan los parámetros del diseño del biodigestor instalado en la finca Marcella. En la Figura 5 se muestra el BDG instalado.

Tabla 4. Especificaciones del biodigestor.

PARÁMETRO	VALOR
TRH	35 días
Diámetro	1,3 m
Longitud	7,5 m
Relación (L/D)	6
Dimensiones de la zanja	Ancho sup: 1 m
	Ancho inf: 0.8 m
	Largo: 7,5 m
	Profundidad: 1 m

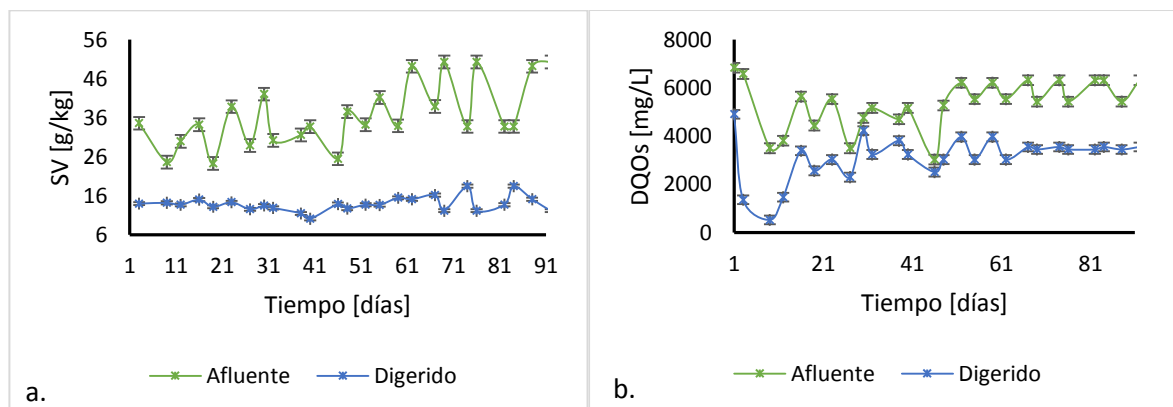
Figura 5. Biodigestor construido e instalado.



3.2. PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN UN BDG

3.2.1. Conversión de materia orgánica. La conversión de la materia en términos de DQOs y SV se muestra en la figura 6. El porcentaje de conversión de SV y DQOs fue de 62% y 42% respectivamente. La conversión y los perfiles de degradación muestran un comportamiento de estabilización de la materia orgánica, demostrando que el proceso se desarrolló satisfactoriamente.

Figura 6. Conversión de materia orgánica. 6a. Concentración de sólidos volátiles. 6b. Concentración de DQOs.

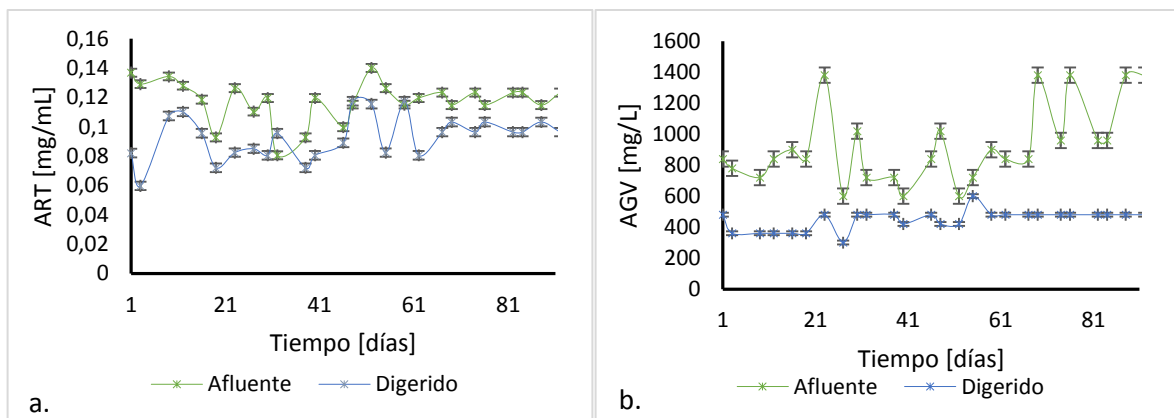


3.2.2. Cinética de la etapa hidrolítica y acidogénica. El comportamiento de los ART y los AGV representa la materia orgánica soluble fácilmente biodegradable.

La figura 7a muestra una disminución en la concentración de ART de la digerido con respecto al afluente del biodigestor de un 21%, lo cual indica que está ocurriendo biodegradación. Los ART del digerido representan la materia soluble no convertida en biogás, esta materia queda disponible en el digerido para aprovecharse en el reciclaje de nutrientes.

La figura 7b muestra la concentración de AGV. La curva registra que en la entrada del biodigestor, la concentración de ácido estuvo entre 600-1380mg/L. Estos valores se mantienen por debajo del límite de inhibición de 8000 mg/L, lo cual disminuye el riesgo de acumulación de AGV y de inhibición por acidificación dentro del reactor (Cirne et al., 2007). Los resultados obtenidos sugieren que es posible aumentar la velocidad de carga orgánica (VCO), para aumentar la materia soluble en el digestor. Sin embargo, un aumento en la VCO puede ocasionar problemas de reología durante el proceso.

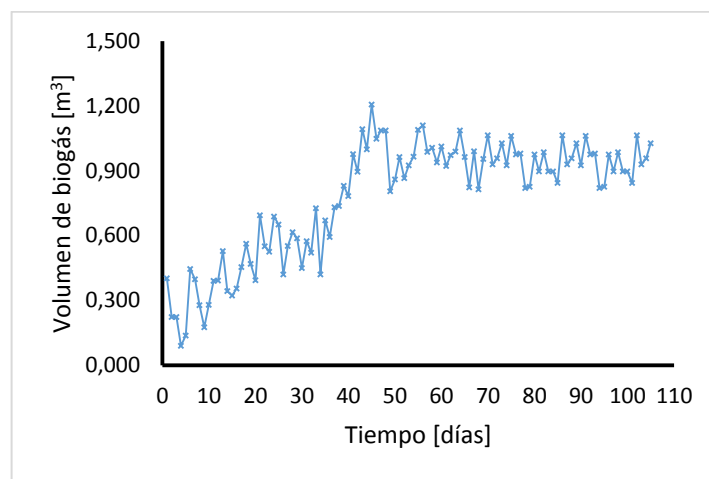
Figura 7. Etapa hidrolítica y acidogénica. 7a. Concentración de ART. 7b. Concentración de AGV.



3.2.3. Producción de biogás. La cinética de la producción de biogás a partir del estiércol bovino generado en la finca Marcella se evidencia en la figura 8. El comportamiento de la producción de biogás puede dividirse en dos etapas.

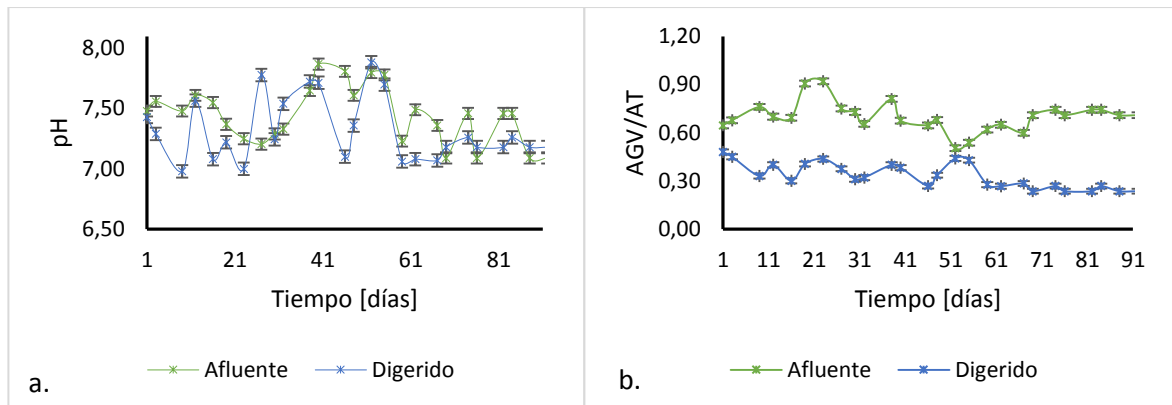
Durante la primera etapa (0 a 35 días) correspondiente a la puesta en marcha, no se aprecia una estabilización debido a que no se supera el TRH en el que los microorganismos digieren toda la materia orgánica presente en el afluente. En la segunda etapa, la producción logra estabilizarse en un valor aproximado de 0,9 m³ de biogás/d hasta el final del monitoreo.

Figura 8. Producción de biogás.



3.2.4. Estabilidad del reactor. Como se muestra en la figura 9a el pH se encuentra en el rango de 6,5 y 8, en el cual se obtiene la máxima producción de biogás en la digestión anaerobia (Poh y Chong, 2009). La relación AGV/AT que se muestra en la figura 9b indica que estas variables se encuentran en una proporción equilibrada, es decir, el proceso es estable y no existe riesgo de inhibición. Los procesos anaerobios suelen estabilizarse entre 0,1 y 0,8.

Figura 9. Estabilidad del proceso. 9a. Comportamiento del pH. 9b. Relación AGV/AT



3.2.5. Producción de biogás a partir del estiércol bovino. En los estudios mostrados en la tabla 5 se evidencia que a mayor temperatura se requiere un menor TRH. La temperatura es una variable que afecta en gran medida la producción de biogás. Como se muestra en la tabla, los valores más altos en el VPB se reportan para los biodigestores que operan a más altas temperaturas, incluido este estudio. Además, se puede apreciar también que hay un efecto de la temperatura en el porcentaje de CH₄.

Por otra parte, los estudios con los valores más altos de VCO reportan mayor velocidad de producción de biogás, evidenciando que la VPB depende directamente de la cantidad de materia orgánica disponible para degradar.

Tabla 5. Rendimientos de biodigestores de la literatura en condiciones típicas de zonas rurales de América, con el fin de compararlos con el rendimiento de la digestión anaerobia de este estudio.

Localidad y latitud (m.s.n.m)	T (°C)	Volumen efectivo (m ³)	TRH (d)	VCO (kg SV/m ³ _{digestor} d)	VPB (m ³ _{biogás} /m ³ _{digestor} d)	PEB (m ³ _{biogás} /kg SV)	PBB (m ³ _{biogás} /bovino·d)	%CH ₄	Referencia
Santander 959	23-26	7,5	35	0,7	0,14	0,87	0,35	65,6	Este estudio
Bolivia 3884	14-18	0,85	124	0,24	0,06	0,23	-	47,2	Martí et al., 2014
Perú 2800	<25	7,5	90	0,22	0,07	0,32	-	-	Ferrer et al., 2011
Perú 2800	16-20	7,5	90	0,34	0,12	0,36	-	55	Garfí et al., 2011
Costa Rica 50	26-27	64	39	-	0,42	4	5,5	62,5	Lansing et al., 2008

Para el biogás producido a partir de la digestión anaerobia de estiércol bovino las concentraciones de H₂S constituyen menos del 0,05% del biogás producido (Lansing et al., 2008).

3.3. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS Y ECONÓMICAS

El biogás producido en la finca Marcella fue usado para reemplazar el gas de cilindro (propano) usado para cocinar antes de la implementación del BDG.

Como se reporta en la tabla 6, el PCI del biogás es inferior al de gas propano, por lo que se requiere una mayor cantidad de biogás para suplir el gasto energético. En este trabajo se demostró que la producción de 0,9 m³/día de biogás generado en la finca Marcella es suficiente para suplir las necesidades energéticas (cocción de alimentos básicos para 5 personas) durante 5 horas diarias.

Tabla 6. Consideraciones energéticas.

	Gas propano	Metano	Biogás
PCI [kJ/m ³]	46.367*	36.000*	23.616
Flujo [m ³ /mes]	18	-	27
Energía [kJ/mes]	834.606	-	637.632

*(Energy, 2016)

Aunque el rendimiento del gas propano es mayor, con la producción de biogás alcanzada se logra un ahorro energético del 76%.

Un cilindro de gas propano de 40 libras tiene un costo en el mercado de \$53.000 aproximadamente y su duración particularmente en la finca Marcella es de 30 días. A partir de lo mencionado anteriormente, el ahorro económico alcanzado con la implementación del BDG es \$40.300/mes.

4. CONCLUSIONES

Se diseñó e instaló un BDG con volumen de 9,5 m³ para la producción de biogás a partir de una mezcla de estiércol bovino y agua, en la finca Marcella.

El monitoreo del proceso de DA se llevó a cabo durante 3 meses. El BDG alcanzó una conversión de carga orgánica de 42% en términos de DQOs y 62% en términos de SV, reduciendo el problema ambiental generado por el estiércol. A su vez, la máxima concentración de AGV fue 1380 mg/L descartando inhibición.

La valorización energética del estiércol bovino disponible en la finca se evidenció con una producción de biogás promedio de 0,9 m³/día que contiene 65,6% de CH₄. La implementación del BDG generó un ahorro energético del 76% y un ahorro económico de \$40.300/mes.

BIBLIOGRAFIA

ANGELIDAKI, I *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*. [en línea] March 2009 Vol 59 N° 5 pp. 927-934. [consultado 3 mayo 2016] Disponible en: <http://wst.iwaponline.com/content/59/5/927.abstract>

ANGELIDAKI, I *et al.* Biomethanation and Its Potential. *Methods in Enzymology*. [en línea] December 2011 Vol 494 pp. 327-351. [consultado 5 mayo 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/50394424>

APHA, AWWA & WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association*. 2005 Washington, D.C.

BERGLUND, M., BORJESSON, P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass Bioenergy*. [en línea] March 2006 Vol 30 pp. 254–266. [consultado 5 junio 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/223706956>

BOTERO, Raúl. El biodigestor de bajo costo, su aporte a la mitigación del cambio climático y su potencial para reducir la pobreza rural en américa latina y el caribe. *UTN informa*. [en línea] September 2011 Vol 13 (57) pp. 60-65. [consultado 25 enero 2016] Disponible en: <https://isfcolombia.uniandes.edu.co/images/documentos/5dejuliobiodigestor.pdf>

CIRNE, D. *et al.* Anaerobic digestion of lipid-rich waste-Effects of lipid concentration. *Renewable Energy*. [en línea] May 2007 Vol 32, pp. 965-975. [consultado 5 febrero 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/222545029>

CASTRO, Liliana. Proceso integral para la digestión anaerobia del bagazo de fique. Trabajo de investigación (Ingeniería química). Universidad Industrial de Santander [en línea] 2012. [consultado 15 marzo] Disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7407/2/142999.pdf>

DANE. Boletín Técnico Encuesta de sacrificio de ganado I- trimestre de 2016. [en línea] Bogotá 2016. [consultado 15 junio 2016] Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/sacrificio/bol_sacrif_ltrim16.pdf

DEPPENMEIER, U. The unique biochemistry of methanogenesis. *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*. [en línea] 2002 Vol 71 pp. 223-283. [consultado 25 marzo 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/11273424>

ENERGY, B. R. 2016. Disponible en: http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html

ESCALANTE, H, *et al.* Atlas de potencial energético de la biomasa residual en Colombia. *Ediciones Universidad Industrial de Santander*. [en línea] 2010. [consultado el 15 enero 2016] Disponible en: <http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/files/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia.pdf>

FERRER, I, *et al.* Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass Bioenergy*. [en línea] May 2011 Vol 35 pp.1668–74. [consultado 25 julio 2011] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/229418441>

FOTIDIS I. A., COSTA T. F., ANGELIDAKI I. Alternative co-digestion scenarios for efficient fixed-dome reactor biomethanation processes. *Journal of Cleaner Production*. [en línea] April 2016 Vol 127. [consultado 20 junio 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/301280203>

GARFÍ, M *et al.* Co digestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecol Eng.* [en línea] December 2011 Vol 37 pp. 2066–2670. [consultado 20 junio 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/230805959>

GARFÍ, M *et al.* Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [en línea] July 2016 Vol 60 pp. 599-614. [consultado 15 Julio 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/293646897>

HERNÁNDEZ O., CASTRO J., Definición de características técnicas y económicas de tres zonas no interconectadas de Colombia para la implementación de fuentes renovables de energía. Universidad de la Salle. [en línea] Bogotá 2010. [consultado 10 enero 2016] Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/16987/T42.10%20C279d.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

INGLIS, Scott. Evaluating payback of farm-scale digesters. In: Proceedings from the 6th Annual BioCycle Conference on Renewable Energy from Organics Recycling. Minneapolis MN, November 2006.

JOBLING PURSER, B. J *et al.* An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Environment Research*. [en línea] September 2014 Vol. 61, pp. 162-170. [consultado 15 mayo de 2016] Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24911562>

KAFLE, G.K., CHEN, L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste Management*. [en línea] February 2016 Vol 48 pp. 492-502. [consultado 15 marzo 2016] Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26531046>

LANSING, S *et al.* Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. *Ecol. Eng.* [en línea] November 2008 Vol 34 pp. 332–348. [consultado 10 Julio 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/222547228>

LESTEUR, M *et al.* First step towards a fast analytical method for the determination of biochemical methane potential of solid wastes by near infrared spectroscopy. *Bioresour. Technol.* [en línea] February 2011 Vol 102 (3) pp. 2280–2288. [consultado 10 marzo 2016] Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21055927>

LOHUIS, H. Does liquid manure spread weeds and bacteria. *PSP-Pflanzenschutz-Praxis*. 1990. 3, 28-30.

MADIGAN, M *et al.* *Biología de los microorganismos*. Pearson Prentice Hall. 8 Edition, 2006 pp. 151-168.

MARTÍ, J *et al.* Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresour Technol.* [en línea] September 2014 Vol 167 pp.87–93. [consultado 10 julio 2016] Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24971949>

MARTÍ, Jaime. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. *Proyecto EnDev Bolivia - Acceso a Energía*. [en línea] 2008 pp. 15-28. [consultado 1 septiembre 2015] Disponible en: www.bivica.org/upload/biodigestores-familiares.pdf

MILLER, G. Use of Dinitrosalicylic acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry*. [en línea] March 1959 Vol. 31 pp. 456-428. [consultado 10 febrero 2016] Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60147a030>

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Cobertura nacional. 2016. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/cobertura-nacional1>

MORGENROTH E., KOMMEDAL R., HARREMOËS P. Processes and modeling of hydrolysis of particulate organic matter in aerobic wastewater treatment – a Review. *Water Science and Technology*. [en línea] February 2002 Vol 45 pp. 25-40. [consultado 2 junio 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/11380185>

PANDEY, P *et al.* Efficacies of inocula on the startup of anaerobic reactors treating dairy manure under stirred and unstirred conditions. *Biomass and bioenergy*. [en línea] July 2011 Vol 35 pp. 2705-2720. [consultado 15 Junio 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/229401650>

PAVLOSTATHIS S.G., GIRALDO-GOMEZ E. Kinetics of anaerobic treatment. *Water Science & Technology*. [en línea] October 1991 Vol 24 pp. 35-59. [consultado 10 enero 2016] Disponible en: <http://wst.iwaponline.com/content/24/8/35>

PHAM C.H., TRIOLO J.M., SOMMER S.G. Predicting methane production in simple and unheated biogas digesters at low temperatures. *Applied Energy*. [en línea] December 2014 Vol 136 pp.1-6. [consultado 12 marzo 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/266205135>

POH.P, CHONG. M. Development of anaerobic digestion methods for palm oil. *Bioresource Technology*. [en línea] January 2009 Vol 100 pp. 1-9. [consultado 10 enero 2016] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/51430476>

RODRIGUEZ L., PRESTON T. Biodigester installation manual. *University of Tropical Agriculture Foundation*. [en línea] Vietnam. [consultado 15 septiembre 2015] Disponible en: <http://www.fao.org/ag/aqa/agap/frq/Recycle/biodig/manual.htm>

SECTOR AGROPECUARIO COLOMBIANO. Balance preliminar del 2015 y perspectivas del 2016. 2015. Disponible en: <http://www.sac.org.co/es/estudios-economicos/balance-sector-agropecuario-colombiano/290-balance-y-perspectivas-del-sector-agropecuario-2012-2013.html>

ANEXOS

ANEXO A. Método de desplazamiento alcalino

Materiales

Una manguera larga con regulador de flujo y agujas hipodérmicas en cada extremo.

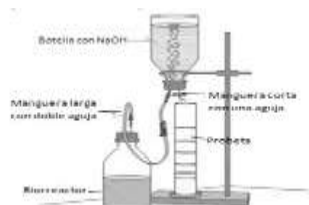
Una manguera corta con aguja en un solo extremo.

Una botella de vidrio con 500 mL de NaOH con fenolftaleína y pH mayor a 12.

Un soporte metálico para la botella y una probeta.

Procedimiento

1. La botella con NaOH se sujeta al soporte con la tapa hacia abajo. En el tapón de butilo que tiene la botella, introducir la aguja de la manguera corta. Debajo de esta manguera, ubicar la probeta.
2. Introducir una aguja de la manguera larga en el tapón de la botella con NaOH, asegurándose previamente que el regulador de flujo esté cerrando el paso del aire. La aguja del otro extremo se introduce en el tapón del biorreactor.
3. Deslizar el regulador de flujo de la manguera larga, para permitir el paso del biogás del biorreactor hacia la botella con solución alcalina.
4. El CO_2 del biogás reacciona con el NaOH y queda atrapado en la solución. El CH_4 no reacciona con la solución y pasa hasta la parte superior de la botella, desplazando un volumen equivalente de solución alcalina, la cual sale por la manguera corta hasta la probeta. Se apunta el volumen desplazado en mL.



Esquema del montaje de medición del volumen de metano.

Cálculos

A fin de comparar la producción de biogás y por tanto el redimiendo, es necesario llevar el volumen de biogás a condiciones normalizadas -VNTP-, con la siguiente ecuación:

$$VNTP = V \frac{(P_{atm} - P_v) * T_0}{P_0 * T}$$

En donde:

VNTP = Volumen de gas en condiciones normales de temperatura y presión (mL)

V = Volumen de gas generado (mL)

P₀ = Presión estándar 1013,25 (mbar)

T₀ = Temperatura estándar 273,15 (K)

P_{atm} = Presión atmosférica

P_v = Presión de vapor del agua (mbar)

T = Temperatura al momento de medir (K)

ANEXO B. Cálculo del PBM teórico

Resultados del análisis elemental del estiércol bovino fresco:

Variable	Unidades	Valor
C	%P/P	39,89
H	%P/P	4,78
O	%P/P	33,50
N	%P/P	1,44

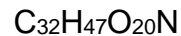
Determinación fórmula empírica:

$$C: \frac{39,89 \% P/P}{12 \text{ g/mol}} = 3,24 \text{ mol} \qquad \frac{3,24 \text{ mol}}{0,102 \text{ mol}} = 32$$

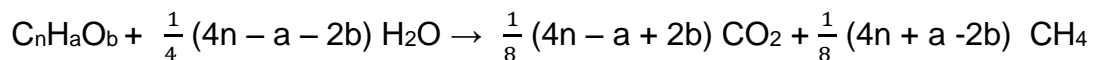
$$H: \frac{4,78 \% P/P}{1 \text{ g/mol}} = 4,78 \text{ mol} \qquad \frac{4,78 \text{ mol}}{0,102 \text{ mol}} = 47$$

$$O: \frac{33,50 \% P/P}{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 2,09 \text{ mol} \qquad \frac{2,09 \text{ mol}}{0,102 \text{ mol}} = 20$$

$$N: \frac{1,44 \% P/P}{14 \text{ g/mol}} = 0,102 \text{ mol} \qquad \frac{0,102 \text{ mol}}{0,102 \text{ mol}} = 1$$



Calculo del PBM_{teórico} con la fórmula de Buswell:



$$PBM_{teó} = \frac{\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}}{12n + a + 16b} \times 22,4 \text{ (m}^3\text{CH}_4\text{/ kg SV)}$$

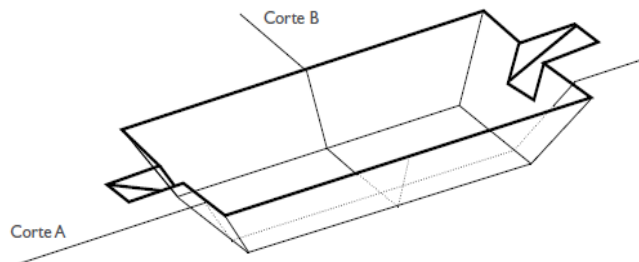
ANEXO C. Cotización materiales

PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
BIODIGESTOR			
Metros de polietileno tubular, transparente, calibre 8, perímetro del rollo de 4 m.	18	\$21.000	\$378.000
Metros de tubo de PVC de 4pulg.	6	\$13.000	\$78.000
Adaptador macho en PVC de ½pulg.	1	\$600	\$600
Adaptador hembra en PVC de ½pulg.	1	\$600	\$600
Codo en PVC de ½pulg.	1	\$700	\$700
Tee en PVC de ½pulg.	1	\$800	\$800
Válvula en PVC de ½pulg.	1	\$8.000	\$8.000
Metros de tubo en PVC de ½pulg.	6	\$1.850	\$11.000
Frasco de soldadura para PVC.	1	\$3.900	\$3.900
Frasco de limpiador para PVC.	1	\$2.700	\$2.700
RESERVORIO Y TUBOS DE CONEXIÓN DE BIOGÁS			
Metros de polietileno tubular, transparente, calibre 8, perímetro del rollo de 4 m.	4	\$21.000	\$84.000
Metros de tubo en PVC de ½pulg.	24	\$1.850	\$44.000
		TOTAL	\$612.300

ANEXO D. Instalación paso a paso del biodigestor

Se debe elegir el punto en donde se instalará el biodigestor, teniendo en cuenta que debe ser accesible y a la vez no interrumpir el camino de animales o personas. Posteriormente, se procede a cavar la caja de instalación, cuyas dimensiones dependerán principalmente del ancho de rollo del plástico que se empleará.

La caja donde estará alojado el biodigestor tubular no debe estar en desnivel, se permite uno de 5% máximo. Los canales inclinados en donde se ubicarán los tubos deben estar a 50 centímetros del suelo, y con un ángulo de 45° en las paredes correspondientes.



Para comenzar la construcción se deben cortar dos mangas de polietileno tubular del largo del biodigestor más 75 cm a lado y lado para los amarres de la entrada y la salida. Se introduce una manga dentro de la otra y se procede a abrir una abertura un poco más pequeña que la del adaptador macho de PVC de ½ pulgada en la mitad que corresponde a la salida del biogás.



Medidas para cortar la manga tubular

Esta abertura por la que sale el biogás estará ubicada en la mitad de la manga tubular. En esta abertura se introduce a presión el adaptador macho con un empaque de plástico de pimpina y uno de neumático entre el adaptador y la manga, quedando siempre este último en contacto con la manga tubular, y por fuera se ajusta el adaptador hembra también con los empaques, quedando el de neumático en contacto con la manga.

Posteriormente, se abre un hueco en la mitad de cada tapa de cuñete, se lijan, se pasa el lazo por dichos huecos, y se anuda el lazo con el fin de que las tapas queden en posiciones fijas, una en la mitad y otra en un cuarto del lazo. Listo el mezclador se introduce dentro de las mangas tubulares y se pasa cada extremo del lazo por los tubos de entrada o salida, correspondiente, quedando los dos extremos del lazo en la parte exterior del biodigestor.



Ubicación de la salida del biogás



Abertura de salida del biogás



Ubicación del adaptador con los empaques



Ubicación del mezclador dentro del biodigestor.

Se prosigue a amarrar con tiras de neumático recicladas los extremos de la manga a los tubos en PVC de 4 pulgadas y 1,5 metros de largo previamente lijados en sus orillos, correspondientes a la entrada y salida (evitando que las puntas del lazo se introduzcan en el biodigestor). Antes de realizar el amarre, el tubo debe ser medido en la zanja quedando uno de los extremos del mismo a una altura de 30

centímetros medidos desde el suelo de la zanja, y los primeros 25 centímetros del tubo que quedan sobre el canal inclinado se marcan para realizar el respectivo amarre.



Doblado de la manga para amarre

Las tiras de neumático deben amarrar sin anudar, la manga tubular quedando completamente tapado su extremo por las tiras de neumático.



Amarre terminado en los 25 centímetros del tubo aproximadamente

Teniendo el biodigestor prácticamente listo se ubica en la zanja, se tapan la salida del biogás y la del líquido con bolsas plásticas y se llena de aire, ayudados de una manga similar a la cortada para realizar el biodigestor y cuando este se encuentre totalmente formado y lleno de aire se empieza a llenar de agua hasta que tape los extremos de los tubos en el interior evitando que el aire se escape.



Ubicación del biodigestor en la zanja. Llenado de aire del biodigestor.

Para terminar, se hace la conexión de la salida de gas, pegando una sección de tubo de 1/2 pulgada al adaptador hembra, seguido de un codo, otra sección de tubo a la que va pegada a una tee, también de 1/2 pulgada. En un extremo de la tee se pega una sección de tubo pequeña que se va a introducir en la botella de 3 litros, siendo esta la trampa de vapor. Al otro extremo va pegada una sección tubo que posteriormente se pega a una válvula que se mantendrá cerrada hasta que se desee el paso del biogás al reservorio.

ANEXO E. Registro fotográfico



Biodigestor finca Marcella



Reservorio de biogás



Estufa de biogás finca Marcella



Contador de gas



Mufla para sólidos volátiles
volátiles



Horno para realiza sólidos