



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE METANO DE LA
CÁSCARA DE CACAO COMO COSUSTRATO DEL ESTIÉRCOL DE
VACA EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

AUTORA

Jael Alejandra Sarmiento Salazar

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE METANO DE LA
CÁSCARA DE CACAO COMO COSUSTRATO DEL ESTIÉRCOL DE VACA
EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en
Prevención y Remediación

Profesor Guía

MSc. Marco Vinicio Briceño León

Autora

Jael Alejandra Sarmiento Salazar

Año

2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Estimación del potencial de producción de metano de la cáscara de cacao como cosustrato del estiércol de vaca en la digestión anaerobia, a través de reuniones periódicas con la estudiante Jael Alejandra Sarmiento Salazar, en el semestre 201910, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Marco Vinicio Briceño León

Máster en Energías Renovables

CI: 1715967319

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

Declaro haber revisado este trabajo, Estimación del potencial de producción de metano de la cáscara de cacao como cosustrato del estiércol de vaca en la digestión anaerobia, de la estudiante Jael Alejandra Sarmiento Salazar, en el semestre 201910, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Santiago Daniel Piedra Burgos

Master of Science in Hydro Science and Engineering

CI: 1715384150

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

Jael Alejandra Sarmiento Salazar

CI: 1724395981

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, a mi hermano y abuelitos por su apoyo incondicional en todos mis años de formación académica.

A los profesores que me han brindado sus conocimientos a lo largo de esta etapa de mi vida, especialmente a mi profesor guía y corrector. Al personal encargado de los laboratorios: Giovanna y Carmita por su paciencia y apoyo.

DEDICATORIA

Para mis padres, hermano y abuelitos.

RESUMEN

La industria del cacao es una de las más importantes en el país, sin embargo su principal residuo que es la cáscara de este fruto, por lo general no es aprovechado al máximo y es arrojado como abono en el suelo creando afecciones para las plantaciones debido a la propagación de un hongo del género *Phytophthora*. Por lo tanto en el presente estudio se dio un enfoque diferente al uso de este residuo empleándolo como una fuente potencial de producción de metano como cosustrato del estiércol de vaca mediante la digestión anaerobia.

La producción de metano se realizó en reactores que contenían determinadas cantidades de estiércol de vaca, cáscara de cacao e inóculo. Se analizaron tres tratamientos con diferentes proporciones de Estiércol: Cáscara de cacao (1:1, 1:2 y 2:1) y un Blanco. Para la cuantificación del metano generado se empleó la metodología de desplazamiento volumétrico utilizando una solución de NaOH. El procedimiento de digestión anaerobia se llevó a cabo durante 47 días donde los reactores estuvieron sometidos a una temperatura de 34°C.

Se evaluó el mejor tratamiento para la producción de metano, el aporte de la cáscara de cacao en dicho tratamiento y la eficiencia de remoción de materia orgánica en cada tratamiento.

Tras desarrollarse la fase experimental se determinó que el mejor tratamiento para la generación de metano era aquel que contenía 50% de estiércol de vaca y 50% cáscara de cacao con una producción acumulada de aproximadamente 1072 ml de metano a condiciones normales de temperatura y presión, y un rendimiento de metano de 167.47 l/kg de sólidos volátiles. De igual manera la eficiencia de remoción de sólidos en este caso superó a los otros tratamientos y el Blanco. Por lo tanto la cáscara de cacao puede ser utilizada para la producción de metano, aplicando un pretratamiento sobre ella y tomando en cuenta los parámetros adecuados para el desarrollo óptimo de la digestión anaerobia.

ABSTRACT

The cocoa industry is one of the most important in the country, however its main residue, that is the husk of this fruit, it is usually not used to the maximum and is thrown as fertilizer in the soil creating bad conditions for plantations due to the propagation of a fungus of the genus *Phytophthora*. Therefore, in the present study a different approach was taken to the use of this waste, using it as a potential source of methane production as a co-substrate of cow dung by anaerobic digestion.

The production of methane was carried out in reactors that contained certain quantities of cow dung, cocoa husk and inoculum. Three treatments were analyzed with different proportions of Manure: Cocoa husk (1:1, 1:2 and 2:1) and a Control. For the quantification of the methane generated, the volumetric displacement methodology was used with a NaOH solution. The anaerobic digestion process was carried out for 47 days where the reactors were subjected to a temperature of 34 ° C.

The best treatment was evaluated for methane production, the contribution of cocoa husk in that treatment and the efficiency of removal of organic matter in each treatment.

After developing the experimental phase it was determined that the best methane generation treatment was that which contained 50% of cow manure and 50% of cocoa husk with an accumulated production of approximately 1072 ml of methane at normal temperature and pressure conditions, and a methane yield of 167.47 l/kg of volatile solids. Similarly, the efficiency of solids removal in this case exceeded the other treatments and Control. Therefore the cocoa husk can be used for the production of methane, applying a pretreatment on it and taking into account the adequate parameters for the optimal development of anaerobic digestion.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo General.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Alcance	5
1.4. Justificación	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Efecto invernadero	7
2.2. Cambio climático	7
2.2.1. Causas del cambio climático	8
2.2.2. Efectos del cambio climático	10
2.3. Mitigación del cambio climático.....	12
2.3.1. Tecnologías desarrolladas en las actividades pecuarias para mitigar el cambio climático.....	12
2.3.2. Tecnologías de generación de energía con biomasa	13
2.4. Digestión anaerobia	15
2.4.1. Concepto y factores que influyen en el proceso	15
2.4.2. Etapas de la digestión anaerobia.....	16
2.4.3. Tipos de biodigestores.....	18
2.4.4. Biogás.....	21
2.4.5. Uso de biodigestores en Ecuador.....	21
2.5. Cacao en Ecuador.....	22
2.5.1. Variedades de cacao en el país.....	22
2.5.2. Producción nacional	23
2.5.3. Residuos en la industria cacaotera.....	25
2.6. Generación de estiércol por actividades ganaderas en el país	27
3. METODOLOGÍA	29

3.1. Obtención de los residuos (cáscara de cacao y estiércol de vaca).....	29
3.2. Preparación de las cáscaras de cacao	31
3.3. Determinación de propiedades físicas del estiércol y cáscara de cacao	32
3.3.1. Sólidos totales	32
3.3.2. Sólidos volátiles.....	32
3.3.3. Humedad	33
3.3.4. Potencial de Hidrógeno (pH)	33
3.4. Obtención del inóculo	34
3.5. Preparación de reactores	35
3.6. Sistema de medición de metano.....	38
3.7. Transformación de resultados a condiciones normales (CN)	39
3.8. Determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica.....	39
4. RESULTADOS	40
4.1. Inóculo.....	40
4.1.1. Potencial de Hidrógeno	40
4.1.2. Producción de metano.....	40
4.1.3. Sólidos totales y volátiles.....	41
4.2. Cantidad de sustrato en cada reactor.....	41
4.3. Propiedades físicas de la materia orgánica	41
4.3.1. Propiedades físicas de la materia orgánica antes de la digestión anaerobia.....	41
4.3.2. Propiedades físicas de la materia orgánica después de la digestión anaerobia	43
4.4. Cantidad de metano producido	46
5. DISCUSIÓN	50
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
6.1. Conclusiones.....	58
6.2. Recomendaciones.....	59

REFERENCIAS	60
ANEXOS	73

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El cambio climático, producido por el incremento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), ha traído consigo alteraciones en el medio ambiente y en los sistemas humanos (Naciones Unidas, s.f.). Los recursos hídricos se han visto ampliamente afectados (en cantidad y calidad), por lo tanto las especies que dependen de estos ecosistemas para sobrevivir han tenido que modificar su distribución geográfica, relaciones interespecíficas e intraespecíficas (Guitérrez y Trejo, 2014). En general los impactos atribuidos al cambio climático se presentan alrededor de sistemas físicos, biológicos y humanos; el calentamiento de la atmósfera y el océano, disminución de la cantidad de nieve y hielo a la par con el incremento de los niveles del mar son, de manera general, los efectos observados en la Tierra. En América Central y del Sur los principales efectos se evidencian en los sistemas hidrológicos, incluyendo sequías e inundaciones, ecosistemas marinos y actividades antrópicas como producción de alimentos, salud y economía (IPCC, 2014). Desde la era preindustrial se han incrementado en un 40% las emisiones de dióxido de carbono atribuidas, principalmente, al uso de combustibles fósiles y cambio de uso del suelo (IPCC, 2013).

En el año 2014 las emisiones mundiales de GEI fueron aproximadamente 36138.285 millones de tCO_{2eq} (Banco Mundial, 2017). Del total de las emisiones globales, América Latina generó 3257 millones de tCO_{2eq} en 2010 representando el 8% de las emisiones totales (Heres, 2015). Ecuador, en 2012, fue responsable de la emisión de 80.63 millones de tCO_{2eq}, lideradas por el sector energía con un 47%. En este sector, el subsector Transporte es el mayor emisor de GEI representando un 45%, en segundo lugar se encuentra el subsector de Industria energética con un 32%, dentro de esta industria se incluyen los procesos de combustión para la producción de electricidad, refinación de petróleo, manufactura de combustibles sólidos y centros de tratamiento de gas (Ministerio del Ambiente, 2017). Por lo tanto es evidente la necesidad de producción de energía empleando fuentes alternativas como la biomasa residual.

Por otro lado, en Ecuador, se producen aproximadamente 162725 ton/año de cacao (ESIN Consultora, 2014) lo que implica una generación de casi 28716 toneladas de residuos al año (Murillo, 2008) cuya composición es 90% cáscara, 8% pulpa y 2% testa (Baena y García, 2012). La industria del cacao obtiene beneficios económicos únicamente del tratamiento de la semilla de este fruto sin tomar en cuenta los subproductos generados (cáscara y pulpa) para su aprovechamiento. Debido al importante porcentaje que representa la cáscara de este fruto dentro de los desechos generados, se han desarrollado diversas alternativas para su uso. Sin embargo en Ecuador este residuo no es aprovechado en su totalidad (Castillo et al., 2010).

Por lo general, este desecho es arrojado como abono sin un proceso previo de compostaje convirtiéndose en una fuente de enfermedades para los cultivos mediante la propagación de un hongo del género *Phytophthora*. Además, se ha intentado darle diversos usos a las cáscaras de cacao, por ejemplo, como alimento para el ganado aunque su alto contenido de alcaloides limita este fin (Baena y García, 2012).

Existen diversas tecnologías empleadas a nivel mundial para aportar a la reducción de emisiones de GEI y disminuir la contaminación. El uso de biomasa para generación de energía, principalmente en el sector rural, ha sido difundido de manera progresiva. Su transformación mediante biodigestores se ha convertido en una de las prácticas más empleadas a nivel global para el tratamiento de residuos y obtención de biogás y un producto líquido que puede ser empleado como fertilizante (Carlin, 2015). La generación de biogás implica el desarrollo de nuevos recursos energéticos renovables, además propicia un adecuado manejo de residuos orgánicos y por último es una tecnología accesible para países en vías de desarrollo.

En Europa, el uso de biodigestores se enfoca a dar solución a dos problemáticas: manejo de residuos sólidos urbanos y agrícolas, y abastecimiento de energía para determinadas zonas desplazando, en lo posible el uso de combustibles fósiles. De acuerdo con la Asociación Europea de Biogás (EBA, por sus siglas en inglés) en 2012 Europa contaba con más de 13800 plantas de generación de

biogás siendo Alemania el país que lideraba este proceso con 8700 plantas (European Biogas Association, 2012).

A nivel de América Latina y el Caribe el trabajo en el tema de biodigestores evidencia un amplio interés. Desde el 2009 se realizan encuentros regionales que impulsan el incremento de conocimiento de biodigestores y su implementación. Estos eventos son organizados, apoyados, auspiciados y patrocinados por diversas instituciones dentro de las cuales lidera la Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe (RedBioLAC). Los encuentros realizados cada año pretenden crear una red de instituciones y personas interesadas en el tema que promueva el desarrollo de esta tecnología y genere directrices para que sea fácilmente accesible a la población de toda la región tomando en cuenta el cumplimiento de necesidades ambientales, energéticas y de biofertilizantes (RedBioLAC, 2017).

A nivel nacional, se cuenta con un Atlas bioenergético cuya finalidad es localizar, describir y cuantificar las áreas que tienen mayor potencial bioenergético. En este documento se analizan tres sectores: agrícola (con productos como el arroz, cacao, banano, café, caña de azúcar, entre otros), pecuario (actividad avícola, porcina y vacuna) y forestal (Ministerio del Ambiente, 2017). Además el Ministerio del Ambiente (MAE) ha fortalecido el desarrollo e implementación de tecnologías que contribuyan a la mitigación del cambio climático. Como resultado de estos esfuerzos, en 2014 el MAE a través de la Subsecretaría de Cambio Climático implementó el proyecto de Generación de Capacidades para el Aprovechamiento Energético de Residuos Agropecuarios (GENCAPER) mediante el cual se pretendía introducir los sistemas de biodigestión en zonas agropecuarias del país mediante un manual fácilmente comprensible para toda la población (J. Martí, Andrade, Hidalgo, y Parra, 2015). En cuanto al aprovechamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, Quito, desde 2016 cuenta con una planta de generación de biogás en el relleno sanitario El Inga cuyo fin es obtener energía (cerca de 5 MW) que ingresa a la red nacional de electricidad (Romero, 2017). Basándose en la iniciativa de esta ciudad, Cuenca, desde el 2019, contará con una nueva Planta de

Aprovechamiento de Biogás que será ubicada en el relleno sanitario de Pichacay, cuyo objetivo es la generación de 2 MW (El Telégrafo, 2017).

El sistema húmedo de biodigestión ha sido ampliamente investigado, por otro lado los biodigestores en vía seca no han sido desarrollados de manera significativa a pesar de que estudios realizados desde 1980 demuestran que la producción de biogás y el rendimiento de metano son más altos en los sistemas cuyos residuos se digieren en su forma sólida. El uso de sistemas secos implica una gran cantidad de desventajas que deben ser analizadas y controladas por el usuario, por lo que la población muestra preferencia por un tratamiento húmedo. Sin embargo existen determinados residuos para los cuales el tratamiento óptimo debería darse por vía seca, por ejemplo, aquellos desechos con una cantidad de sólidos totales alrededor del 20% (Cho et al., 2013) mostrando mejor eficiencia de 10% - 28%. Una vez que se ha superado este porcentaje se presentan heterogeneidades y cambios de metabolismo desfavorable para la producción de hidrógeno (Motte et al., 2013). En diversos estudios se determina la necesidad de optimización de esta tecnología lo que implicaría un incremento de la investigación en este campo principalmente en cuanto a parámetros operacionales y de control, presencia de microorganismos y el diseño y operación del reactor (Kothari, Pandey, Kumar, Tyagi, y Tyagi, 2014). Los parámetros mencionados han sido ampliamente estudiados para la tecnología de biodigestión húmeda concluyendo que la mezcla de residuos (Tay, 2017) y su dilución influyen notablemente en el rendimiento de biogás y biofertilizante (Barrera, 2017).

Por lo tanto la digestión anaerobia o biodigestión se posiciona como técnica de uso de residuos orgánicos y su transformación en productos aprovechables ambientalmente amigables que sustituyen las tecnologías actuales basadas en el uso de combustibles fósiles y que es presentada en este estudio como una alternativa a la reducción de GEI y además, promoviendo el uso del residuo más importante de la industria cacaotera en el Ecuador.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Identificar el potencial de producción de metano de la cáscara de cacao como cosustrato del estiércol de vaca en la digestión anaerobia.

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Establecer las propiedades físicas de la materia orgánica empleada antes y después del proceso de digestión anaerobia.
- ii. Determinar la proporción de estiércol – cáscara de cacao con el mejor rendimiento de producción de metano.
- iii. Analizar la eficiencia de remoción de materia orgánica del efluente al finalizar el proceso de digestión anaerobia.

1.3. Alcance

El presente estudio buscó la identificación del potencial de producción de metano de la cáscara de Cacao Nacional como cosustrato del estiércol de vaca, tomando en cuenta la escasez de procesos de tratamiento o uso del residuo de una de las industrias más importantes del país.

Para esto se realizaron ensayos de laboratorio simulando biodigestores con tres distintas relaciones estiércol-cáscara de cacao, se analizaron las propiedades físicas (cantidad de sólidos totales, volátiles, humedad y pH) de la materia orgánica empleada, se cuantificó el metano generado en cada tratamiento y blanco empleando el método de desplazamiento volumétrico y se analizó la eficiencia de remoción de materia orgánica en el efluente tras realizar el proceso de digestión anaerobia.

1.4. Justificación

El aumento de población mundial es progresivo y, por ende, el incremento de las actividades humanas generadoras de GEI que traen consigo como resultado cambios inequívocos en el sistema climático (IPCC, 2014). Por lo tanto es imprescindible el desarrollo de investigación e implementación de tecnologías que pretendan mitigar el cambio climático y adaptarse a él. Además, tomando en cuenta que la fracción de residuos orgánicos generados en el país supera al porcentaje de residuos inorgánicos (INEC y AME, 2014) es importante la propuesta y desarrollo de técnicas que empleen este tipo de residuos de manera óptima. La digestión anaeróbica, a partir del tratamiento de materia orgánica, es una tecnología ampliamente analizada cuya finalidad es la obtención de productos gaseosos y líquidos de gran utilidad como el biogás y el biol (Ferrer, Uggetti, Poggio, y Velo, 2008), siendo un medio de potenciar la mitigación del cambio climático (FMAM, SGP, PNUD, y UNOPS, 2009).

Considerando la cantidad de residuos orgánicos generados en la industria de cacao, esta importante industria ecuatoriana debe ser motivo de análisis para su empleo en biodigestores. Sin embargo, debido a que los cultivos de cacao están limitados a climas tropicales, el uso de su cáscara en biodigestores no ha podido ser analizado ampliamente a pesar de que su contenido de azufre es casi nulo, presentando una ventaja sobre otras biomásas utilizadas (contenido de carbono 42% aproximadamente) (Sánchez, 2013).

En ese sentido, el progreso de la investigación en este ámbito podrá contribuir con mejores técnicas de manejo de estiércol y aprovechamiento de residuos orgánicos generados en las grandes industrias. El biogás, como medio de lucha contra el cambio climático, puede ser empleado para cocción, calefacción o transformación en energía desplazando las técnicas comunes que emplean recursos fósiles para dar paso a dichas actividades. Tomando como base las iniciativas desarrolladas a nivel local y nacional, donde no se toma en cuenta la proporcionalidad de los residuos orgánicos para un mejor rendimiento en la producción de biogás ni aplicaciones a escala industrial, el presente estudio pretende darle importancia a estos dos aspectos mencionados mediante el uso

de la cáscara de cacao en biodigestores cuyos productos podrían generar beneficios económicos y medioambientales en las empresas relacionadas con la producción de cacao.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Efecto invernadero

El efecto invernadero es un proceso propio de la naturaleza mediante el cual se mantiene una temperatura adecuada para la vida en la Tierra pues mediante una capa de GEI se retiene una determinada parte del calor proporcionado por el sol (Naciones Unidas, s.f.).

Los GEI son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3) y los clorofluorocarbonos (de origen antropogénico) (Secretaría de Ambiente, 2011). Su emisión a la atmósfera es causada por procesos naturales y antrópicos, en el primer caso se aprecian actividades como la descomposición de material vegetal y animal, incendios forestales naturales, actividad volcánica y bacteriológica, evaporación del agua, entre otros. En cuanto a las emisiones generadas por la acción del hombre se presenta la quema de combustibles fósiles, deforestación, agricultura, ganadería y tratamiento de residuos como principales causas de emisión de GEI (OCEANA, s.f.).

2.2. Cambio climático

Un aumento en la concentración de GEI en la atmósfera intensifica la capacidad de retención de calor para el planeta generando cambios en el mismo. Son evidentes las alteraciones meteorológicas generadas en las últimas décadas a nivel mundial. El cambio climático es una de las problemáticas más abordadas en los últimos tiempos a nivel científico y político. El fenómeno en cuestión implica un aumento de temperatura en la superficie y la atmósfera de la Tierra (Naciones Unidas, s.f.). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés, en su último informe determina

que en el período 1880 – 2012 se generó un aumento de temperatura de 0,85°C. Además, se observa un incremento en el nivel del mar y disminución de las zonas con nieve y hielo (IPCC, 2014).

2.2.1. Causas del cambio climático

Existe un evidente incremento de GEI en la atmósfera a partir del siglo XX por lo que el cambio climático es atribuido en su mayoría, con un 95%-100% de probabilidad, al ser humano y las actividades cuyo desarrollo se ha incrementado a partir del crecimiento de la población junto a sus necesidades económicas (IPCC, 2014). De acuerdo al Cuarto Informe desarrollado por el IPCC, se establece que el sector de suministro de energía lidera las emisiones globales de GEI, siendo el CO₂ generado por la quema de combustibles fósiles la actividad con más aporte a las emisiones de GEI por parte del ser humano (IPCC, 2007). Estos datos están acorde a las cifras emitidas para Ecuador en el 2012 en la Tercera Comunicación Nacional donde el sector Energía ocupa el primer lugar de las emisiones de GEI del país (Ministerio del Ambiente, 2017).

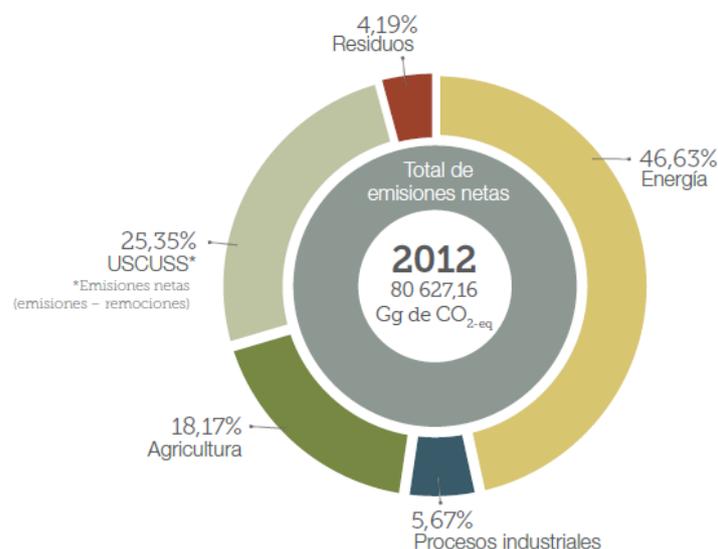


Figura 1. Porcentaje de emisiones de GEI por sectores en Ecuador en el 2012 en términos de CO₂-eq.

Tomado de (Ministerio del Ambiente, 2017).

2.2.1.1. Emisiones de GEI en el sector energético en Ecuador

El Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) considera las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (mayor contaminante de este sector), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) dentro del sector Energía en el año 2012 fueron responsables de cerca de 37.60 millones de toneladas de CO₂-eq. La categoría de quema de combustibles hace referencia a las emisiones producidas por las actividades dedicadas a la producción de energía y combustible; en ese sentido, la subcategoría Transporte ocupa el primer lugar en cuanto a las emisiones de GEI del Sector Energía con un 45.16%, seguido por la Industria de la energía con 31.98%. Además la Tercera Comunicación Nacional, menciona un evidente crecimiento de las emisiones de CO₂, asociadas a este sector, partir del año 2010 (Ministerio del Ambiente, 2017).

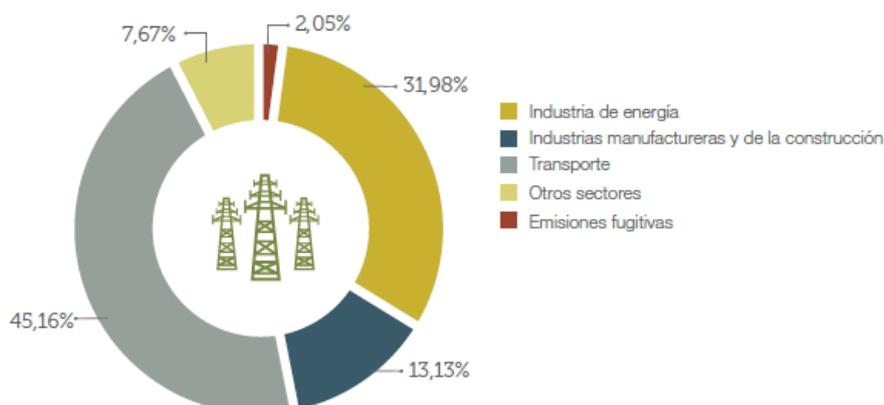


Figura 2. Distribución de las emisiones de GEI en el Sector Energía del Ecuador en el 2012.

Tomado de (Ministerio del Ambiente, 2017).

2.2.1.2. Emisiones de GEI en el sector agrícola en Ecuador

En la Tercera Comunicación Nacional se reportan las emisiones del Sector Agricultura relacionadas con las actividades agropecuarias, específicamente se hace referencia a las categorías de manejo de estiércol, cultivo de arroz, quema prescrita de sabanas, quema en el campo de residuos agrícolas, suelos agrícolas y fermentación entérica; siendo las dos últimas actividades las que más aportan

en las emisiones de GEI dentro de este sector. En el 2012, las emisiones del Sector Agricultura en Ecuador fueron aproximadamente 14.65 millones de toneladas de CO₂-eq dentro de las cuales se contabilizan aquellas generadas en términos de CH₄ y N₂O (Ministerio del Ambiente, 2017).

La fermentación entérica toma en cuenta las emisiones de CH₄ generadas debido al proceso digestivo de los animales rumiantes. Un rumiante adulto puede generar casi 17 litros de metano por hora liberados al medio ambiente, en mayor parte, por eructación (Martín, de Jesús Rojas, Arenas, y Herrera-Franco, 2017). Adicionalmente el manejo de estiércol toma en cuenta las emisiones generadas de CH₄ (sistemas líquidos de almacenamiento) y N₂O (sistemas sólidos de almacenamiento) (FAO, s.f.-b).

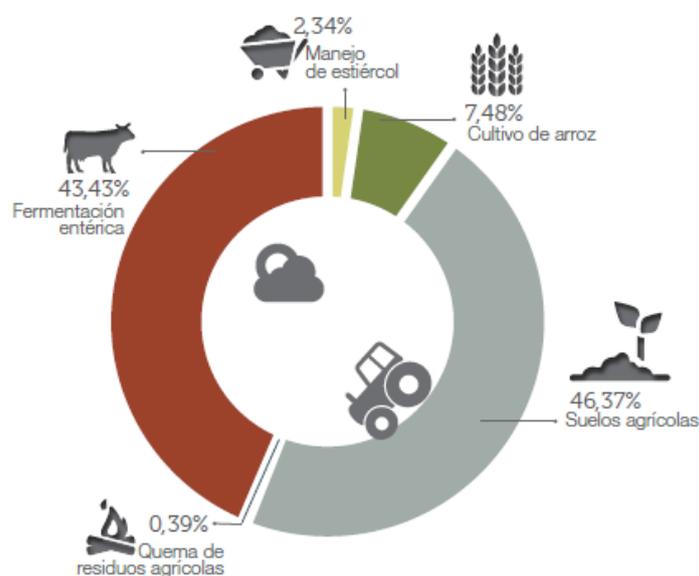


Figura 3. Distribución de las emisiones de GEI en el Sector Agricultura del Ecuador en el 2012 en términos de CO₂-eq.

Tomado de (Ministerio del Ambiente, 2017).

2.2.2. Efectos del cambio climático

Las repercusiones del cambio climático son presenciadas a nivel de sistemas físicos (glaciares, sistemas hidrológicos y el suelo), sistemas biológicos (ecosistemas terrestres y marinos) y sistemas humanos (producción de alimentos, salud y economía). Los sistemas naturales presentan una mayor

evidencia de los efectos del cambio climático con alteraciones en los medios hidrológicos (IPCC, 2014); cambios en la distribución geográfica de especies vegetales (Guitérrez y Trejo, 2014) y animales (Pecl et al., 2017); e incremento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos y climáticos (IPCC, 2014) proyectando un incremento en la probabilidad de sequías y eventos extremos (Kerr, 2005).

En cuanto a los sistemas hidrológicos, existe variación de su calidad y cantidad (IPCC, 2014) principalmente asociados a la presencia de eventos extremos como sequías e inundaciones (Amay y López, 2015).

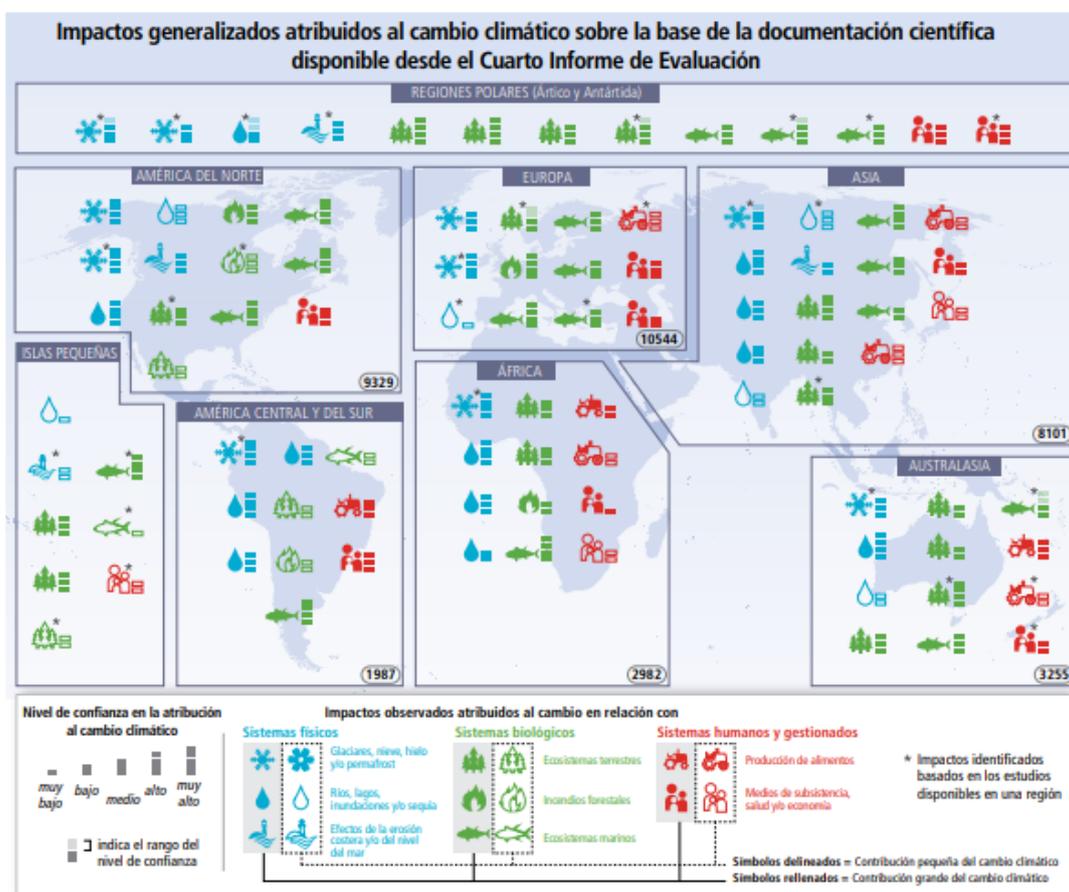


Figura 4. Impactos atribuidos al cambio climático en los sistemas físicos, biológicos y humanos a nivel global y regional. Tomado de (IPCC, 2014).

2.3. Mitigación del cambio climático

Existen dos acciones globales contra el cambio climático, estas son la adaptación y mitigación. La adaptación al cambio climático hace referencia a las medidas, políticas y tecnologías desarrolladas para que el ser humano pueda adecuarse y hacer frente a los impactos ocasionados por este fenómeno (FAO, s.f.-a). Por otro lado la mitigación del cambio climático toma en cuenta las acciones desarrolladas con la finalidad de reducir y evitar las emisiones de GEI en virtud de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2017).

2.3.1. Tecnologías desarrolladas en las actividades pecuarias para mitigar el cambio climático

Para reducir las emisiones de GEI en cuanto al metano entérico generado por el ganado se han desarrollado diversas actividades como mejoras en la alimentación del ganado, uso de sustancias y aditivos en el alimento, y perfeccionamiento en las tareas de productividad y crianza de animales (Subash, Dong, Kimball, Garg, y Upadhyay, 2012).

Por otro lado, se han fomentado medidas que propicien el manejo adecuado de desechos sólidos generados por el ganado, tales como el recubrimiento de abono con materiales de determinada densidad para evitar que esté en contacto con el aire y disminuyan así las reacciones que pueden causar las emisiones de GEI. El proceso de compostaje es otra de las alternativas implementadas, esta técnica consiste en la descomposición de materia orgánica mediante microorganismos expuestos al aire (Hristov et al., 2013) dando como resultado un compuesto empleado como fertilizante. Finalmente una de las técnicas más desarrolladas han sido los biodigestores que son sistemas cerrados (sin presencia de aire) que transforman los residuos orgánicos en una parte gaseosa y otra parte líquida aprovechables (Cotrina, 2011).

2.3.2. Tecnologías de generación de energía con biomasa

El incremento de la demanda de energía y combustibles, y la necesidad de evitar las emisiones de CO₂ al medio ambiente han conllevado al desarrollo de tecnologías renovables de generación de energía. La bioenergía es un término que se refiere a la obtención de energía a través de la biomasa, es decir, cualquier tipo de materia orgánica. La biomasa podrá ser empleada para obtener energía eléctrica, térmica y biocombustibles (CAF, 2015).

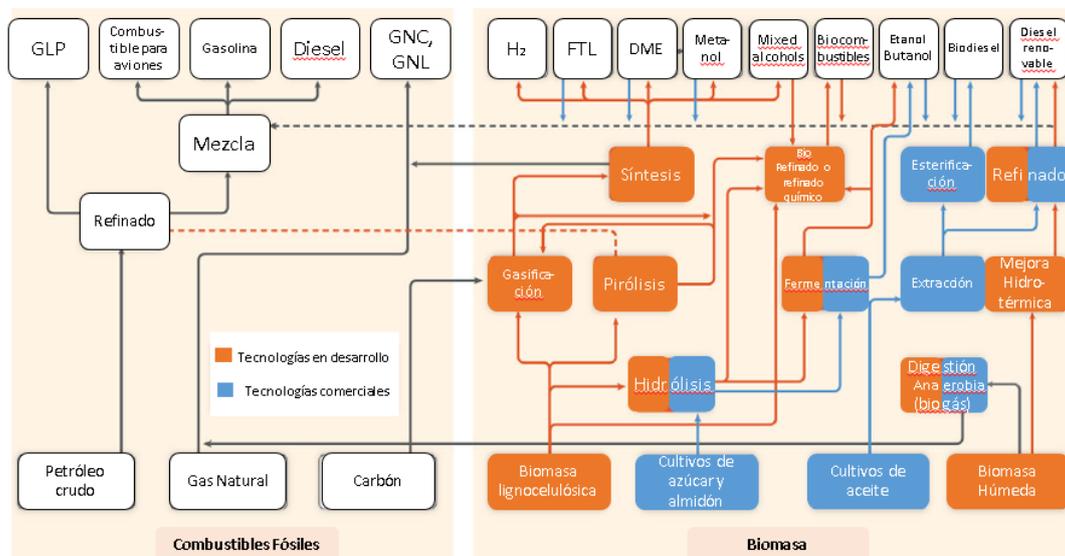


Figura 5. Vías de producción de combustibles líquidos y gaseosos a partir de biomasa, en comparación, con los combustibles fósiles.

Adaptado de (Creutzig et al., 2015).

- Tecnologías de conversión

Existen tecnologías de conversión que permiten la transformación de la materia orgánica en calor, energía eléctrica y combustibles (Edenhofer, Pichs Madruga, y Sokona, 2012). En la actualidad para la producción de energía a partir de biomasa se ha recurrido en su mayoría al uso de sistemas híbridos de biomasa – combustibles fósiles (REN21, 2013; Junginger, Goh, y Faaij, 2014) Por ejemplo las tecnologías de ciclo combinado de gasificación integrada, IGCC por sus siglas en inglés es una de las mejores opciones para producir electricidad y combustibles líquidos a partir de carbón y biomasa (Creutzig et al., 2015).

La tecnología IGCC se basa en el uso de carbón para generar una combustión limpia y obtener gas de síntesis que es tratado para eliminar contaminantes e impurezas y finalmente es empleado como combustible para generar energía. Adicionalmente, se propicia la recuperación de calor proporcionado por el vapor para producir más energía y por ende, mejorar la eficiencia (Evans, 2015).

Existen otras tecnologías de conversión destinadas a la producción de energía mediante la combinación de biomasa y combustibles fósiles como el tratamiento hidrotérmico de aceites vegetales, el isobutanol y la síntesis de Fischer – Tropsh a partir de la gasificación de biomasa (Hamelinck y Faaij, 2006; Creutzig et al., 2015).

- Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono

Esta tecnología más conocida como BECCS, por sus siglas en inglés, garantiza remoción permanente de CO₂ de la atmósfera. El uso de tecnologías para generación de energía a partir de la biomasa son consideradas carbono neutral, pues el CO₂ emitido en el proceso de producción es compensado con el CO₂ que fue tomado por la biomasa para la fotosíntesis (Pour, Webley, y Cook, 2018); sin embargo BECCS tras la generación de energía captura el CO₂ que pudo ser emitido a la atmósfera, por lo tanto las emisiones de esta técnica son consideradas negativas e incluso pueden llegar a compensar las emisiones residuales en otros sectores (Creutzig et al., 2015). Existen 20 proyectos BECCS a nivel global ubicados en su mayoría en América del Norte, Europa y Escandinavia (Kemper, 2015).

- Biocombustibles a partir de celulosa y microalgas

Las microalgas se presentan como una alternativa a la bioenergía terrestre (Creutzig et al., 2015) siendo un portador de energía de tres tipos: sólido (como su combustión directa), líquido (como biodiesel o bioetanol) y gas (como biogás o gas de síntesis) (Kumar et al., 2016). Por otro lado, se sugiere el uso de materia prima lignocelulósica producida por desechos o residuos, o cultivadas en terrenos que no estén destinados para la generación de alimentos, además dicha materia prima podría ser reproducida netamente para fines energéticos (Creutzig et al., 2015).

- Producción de biogás

Tras un proceso de digestión anaerobia se genera biogás que ha sido establecido como uno de los medios viables para la obtención de energía continua. Este sistema implica la actividad microbiana en la degradación de residuos orgánicos en condiciones específicas (Mao, Feng, Wang, y Ren, 2015) que producirán un gas con alto contenido de metano con alto potencial para ser transformado en energía.

2.4. Digestión anaerobia

2.4.1. Concepto y factores que influyen en el proceso

La digestión anaerobia hace referencia al proceso de fermentación generado por microorganismos sin presencia de oxígeno, dando lugar a una mezcla de gases (en su mayoría CH_4 y CO_2) llamada biogás, un residuo líquido (biol) y un lodo (biosol) (Acosta y Obaya, 2005). El material empleado en este proceso debe ser biodegradable y se da mediante el uso de reactores (biodigestores) sin acceso a oxígeno donde diversos parámetros deben ser controlados para alcanzar una alta eficiencia (Agro Waste, 2013).

Los factores que deben ser controlados en un biodigestor son principalmente el pH, temperatura, humedad, nutrientes y toxinas. En cuanto al pH, se pretende alcanzar un rango óptimo entre 6.8 y 7.5 (González, Rustrián, y Houbron, 2008). Sin embargo se puede trabajar con un pH entre 6 y 8, fuera de este rango la digestión anaerobia presenta disminución en la eficiencia de producción de metano e incluso detención del proceso. Por otro lado, la temperatura idónea para el desarrollo de los microorganismos es el rango mesofílico (20 – 45°C), siendo la temperatura ideal alrededor de 35°C (Montes, 2008) pues los microorganismos que trabajan en rangos termofílicos (50 – 65°C) son muy sensibles a pequeños cambios de temperatura y para alcanzar esta temperatura será necesario el uso de energía (Yilmaz y Atalay, 2003). Adicionalmente, se recomiendan tratar residuos con una humedad superior a 60% para una buena metanogénesis (Robles, 2005), también se debe propiciar una relación C:N:P

150:15:1 (González et al., 2008) y evitar la presencia de toxinas orgánicas o inorgánicas que detengan el crecimiento microbiano (Yilmaz y Atalay, 2003). Finalmente, una de las variables que influyen en el proceso de digestión anaerobia es el tamaño de las partículas del material orgánico, para lo cual se recomienda un tamaño menor a 10 mm (Asociación de Ingenieros Alemanes, 2016) y por otro lado, el porcentaje de sólidos totales presentes en el biodigestor que se recomienda entre un 8-12% (MINENERGIA, PNUD, FAO,GEF, 2011; Mukumba, Makaka, y Mamphweli, 2016)

2.4.2. Etapas de la digestión anaerobia

Las cuatro etapas más significativas de este proceso son: hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica. En cada una de estas fases intervienen determinados microorganismos generando ciertos productos (Martí, 2006).

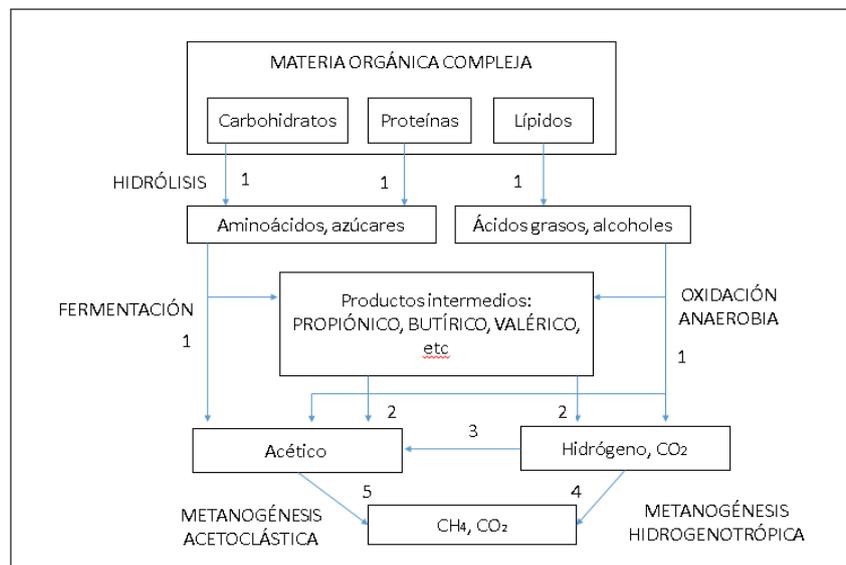


Figura 6. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materia polimérica.

Adaptado de (Martí, 2006).

Nota: Los números hacen referencia al tipo de microorganismos que actúan en cada proceso: 1-bacterias fermentativas; 2-bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno; 3-bacterias homoacetogénicas; 4-bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5-bacterias metanogénicas acetoclásticas

- Hidrólisis

Es el primer paso para la digestión anaerobia de medios orgánicos con estructura compleja. Para lograr la hidrólisis de las moléculas complejas, actúan enzimas extracelulares (exoenzimas) generadas por microbiota de carácter hidrolítico hasta obtener los monómeros deseados (Acosta y Obaya, 2005). Esta etapa puede ser importante para el establecimiento de la velocidad del proceso en general, además depende en gran medida de las condiciones iniciales del sistema de digestión: pH, temperatura, composición del sustrato, tamaño de las partículas y concentración de NH_4^+ (Martí, 2006).

- Etapa fermentativa o acidogénica

En esta fase ocurre la fermentación de las moléculas orgánicas solubles para obtener material que pueda ser empleado por los microorganismos metanogénicos (Martí, 2006). Los productos de esta etapa son principalmente ácidos orgánicos como acético, propiónico y butírico (Acosta y Obaya, 2005) generados por bacterias acidogénicas que son facultativas, es decir pueden actuar en presencia o ausencia de oxígeno (De La Torre, 2008).

- Etapa acetogénica

Mediante las bacterias acetogénicas se transforman algunos compuestos que aún no pueden ser metabolizados por los microorganismos metanogénicos. De esta forma, el etanol, ácidos grasos volátiles, entre otros compuestos son modificados para generar materiales más sencillos (Martí, 2006) como ácido acético, hidrógeno y CO_2 (Acosta y Obaya, 2005).

- Etapa metanogénica

Esta última etapa es ejecutada gracias a los microorganismos metanogénicos que producen CH_4 mediante el ácido acético o combinaciones de H_2 y CO_2 (o a partir de ácido fórmico o metanol) (Acosta

y Obaya, 2005). De acuerdo al tipo de sustrato empleado, los microorganismos pueden ser hidrogenotróficos (cuando consumen H_2 , CO_2) y acetoclásticos (consumen acetato, metanol y aminas) (Martí, 2006).

2.4.3. Tipos de biodigestores

Un biodigestor es un tanque hermético en el cual se colocan residuos orgánicos con determinada cantidad de agua con la finalidad de obtener biogás. Se emplean tanques cilíndricos, rectangulares y esféricos, siendo los rectangulares los menos recomendados pues es necesaria una gran cantidad de material de construcción zonas internas con diferente composición y temperatura. De acuerdo al tipo de construcción los biodigestores por lo general pueden ser de domo flotante (tipo hindú), de domo fijo (chino) o biodigestores de globo (Corona, 2007).

El biodigestor de domo flotante cuenta con una estructura subterránea (digestor) y una campana flotante (de acero) cuyo movimiento dependerá de la presión del biogás generado. En los costados posee una tubería de entrada para la materia orgánica y una tubería de la salida de dicha materia digerida (Fundación Hábitat, 2005). Dentro de sus ventajas se encuentra su fácil operación y comprensión del sistema, mientras que como desventajas se presenta el alto costo de construcción del tambor de acero y su posibilidad de corrosión (Corona, 2007).

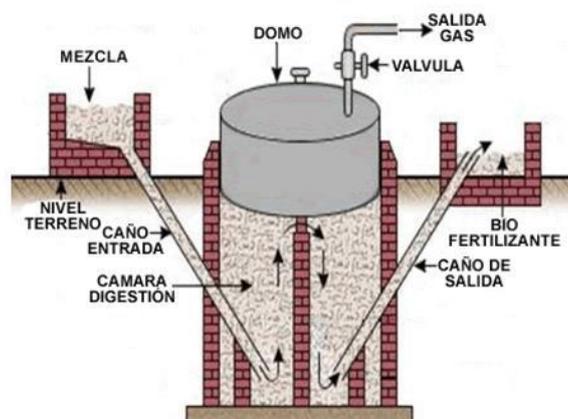


Figura 7. Esquema de un biodigestor tipo hindú.

Tomado de (Guerrero, 2016).

Los biodigestores de domo fijo poseen un sistema similar al de domo flotante pero, en este caso, todo el sistema debe estar enterrado y sobre la cámara de digestión se encuentra una estructura sin movilidad. El incremento de producción de biogás genera un aumento en la presión de la estructura interna lo que conlleva a la expulsión del material ya digerido fuera de la cámara de digestión. Una de sus ventajas más importantes es la dificultad en caso de fugas en el domo pues se pueden perder grandes cantidades de biogás, por lo que se recomienda este tipo de biodigestores en casos donde exista una supervisión continua del sistema (Corona, 2007).

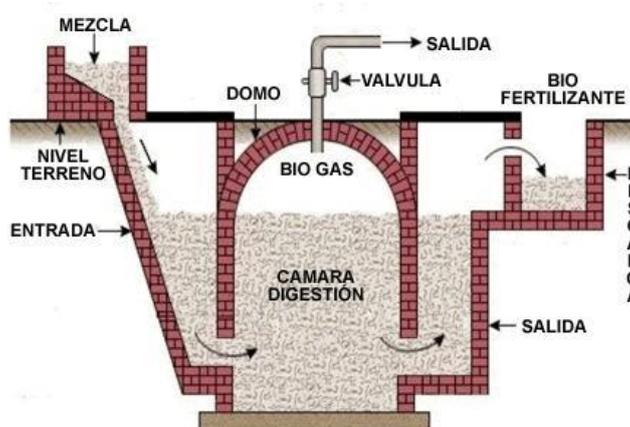


Figura 8. Esquema de un biodigestor de domo fijo.

Tomado de (Guerrero, 2016).

Los biodigestores de globo son estructuras subterráneas (por lo general de polietileno) en donde el biogás es almacenado en la superficie del espacio de digestión. A sus costados se encuentran tuberías de entrada y salida de la materia orgánica (Corona, 2007).



Figura 9. Biodigestor tipo globo.

Tomado de (Botero, 2011).

Por otro lado, los biodigestores de acuerdo a la frecuencia de carga pueden ser clasificados como: Batch o discontinuo, semi continuo o continuo (ITDG, s.f.).

El biodigestor Batch consiste en un sistema de carga única, es decir se realiza la introducción de materia orgánica, ocurre el proceso de digestión anaerobia y su descarga se da una vez que la producción de biogás haya finalizado. Este tipo de sistemas puede darse en caso de que la materia prima presente condiciones que impidan la rápida digestión de los residuos o cuando dicha materia se encuentra disponible en ciertos períodos de tiempo (MINENERGIA, PNUD, FAO,GEF, 2011).

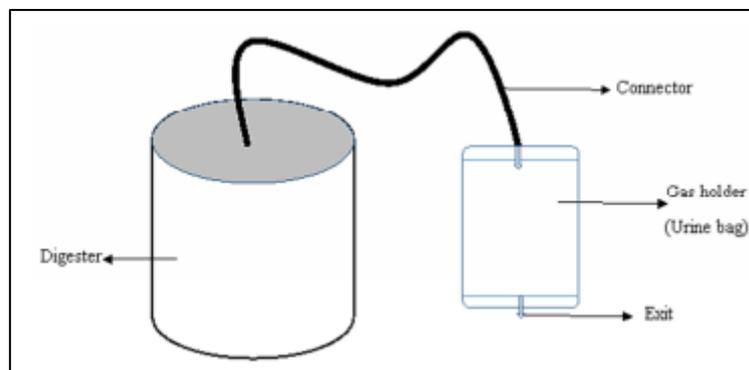


Figura 10. Esquema de biodigestor Batch o por lotes.

Tomado de (Ismail y Adewole, 2014).

El biodigestor semi continuo abarca los biodigestores de tipo chino e hindú, es uno de los sistemas más empleados a nivel rural pues permite realizar la carga una vez al día y la producción de biogás es casi constante cuando las medidas de operación no varían ampliamente (ITDG, s.f.).

Los biodigestores de carga continua ocupan grandes volúmenes y son empleados para la generación de energía. Este tipo de sistemas cuentan con una carga constante de materia orgánica y sus parámetros, como agitación y temperatura, llevan un control minucioso. Una de las desventajas es su nivel de dificultad al ser necesario el manejo de sustratos totalmente líquidos, sin embargo una de sus ventajas es la alta eficiencia del proceso (Moncayo, 2008).

2.4.4. Biogás

El biogás es generado por bacterias metanogénicas responsables de la de la degradación de materia orgánica con ausencia de oxígeno. Esta mezcla de gases está compuesta en su mayoría por metano (60-80%), dióxido de carbono (30-40%) y otros gases como nitrógeno, monóxido de carbono, hidrógeno, vapor de agua, ácido sulfúrico y oxígeno. El volumen de biogás obtenido en las investigaciones generadas debe ser reportado en condiciones normales (0°C y 1 atm) con la finalidad de poder comparar diversos estudios (Apolo, 2015). La cantidad de metano presente en el biogás dependerá de varios factores de operación como humedad, temperatura, tiempo de retención y pH; además el porcentaje de metano será superior con un contenido alto de grasas en comparación con un alto contenido de hidratos de carbono (Gallardo y Riofrío, 2010).

2.4.5. Uso de biodigestores en Ecuador

En Ecuador se han implementado a diferentes escalas diversos proyectos de aprovechamiento energético de residuos agropecuarios. A nivel industrial uno de los proyectos en ejecución es la Planta Semi-industrial de digestión anaerobia en Latinoamericana de Jugos S.A. con el apoyo de instituciones privadas y públicas como la Universidad San Francisco de Quito, Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad, y la Asociación de Estudios Judíos de Latinoamérica (LAJSA por sus siglas en inglés) (Ministerio del Ambiente, 2017a). Adicionalmente, debido a la alta presencia de granjas porcícolas en el sector rural, el Ministerio de Ambiente a través de la Subsecretaría de Cambio Climático implementó en el 2015 el Proyecto de Generación de Capacidades para el Aprovechamiento Energético de Residuos Agropecuarios (GENCAPER). En ese sentido, se montaron plantas de biodigestión simples (biodigestores tipo globo) en las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas y el Oro y se impulsó el uso de estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales generadas en las granjas de la zona, de esta manera se obtienen beneficios económicos y

medio ambientales al emplear el biogás y biol como reemplazo de combustibles fósiles y fertilizantes (Ministerio del Ambiente, 2015).

2.5. Cacao en Ecuador

El cacao, cuyo nombre científico es *Theobroma cacao L.*, es una especie de ciclo vegetativo perenne. Por lo general su crecimiento se da en los bosques tropicales húmedos de América del Sur y su desarrollo alcanza los 2 o 3 metros de altura (en cultivo). El clima idóneo para el cacao es cálido húmedo (entre 20°C y 30°C) con una precipitación anual de 1500-2000 mm (ESIN Consultora, 2014).

2.5.1. Variedades de cacao en el país

Tradicionalmente se conocían tres tipos de cacao, criollo, forastero y trinitario (cruce de los dos anteriores). Sin embargo en el 2008 científicos determinaron que ya no se podía hablar de esta división y en su lugar mencionaron 10 tipos genéticos de cacao. En Ecuador existen dos tipos principales de cacao destinados a la comercialización, Cacao Nacional y CCN 51 (Corporación Fortaleza del Valle, 2018).

La primera variedad, es también conocida como Cacao Arriba fino de aroma haciendo alusión a sus peculiares características de sabor y fragancia aclamadas por los fabricantes de chocolates (Anecacao, 2015). El color característico del fruto del Cacao Nacional es el amarillo y su grano está destinado especialmente a la producción de chocolate (APRIM, s.f.). El 22 de julio de 2005 el Cacao Nacional fue declarado “Producto simbólico del Ecuador” según el Acuerdo Ministerial N° 070 del Ministerio de Agricultura y Ganadería (Sánchez, 2013).

La variedad CCN 51 es un tipo de cacao clonado, obtenido en 1965 por el agrónomo Homero Castro Zurita. Las siglas de su nombre significan Colección Castro Naranjal debido a la persona que encontró el tipo 51 y la ubicación de su

finca, uno de los productos de destino principales de esta variedad es la manteca (Fajardo, s.f.). Se caracteriza por su fruto color rojizo y su alto rendimiento productivo por ser resistente a las enfermedades (Anecacao, 2015).

Las diferencias principales entre estos dos tipos de cacao es su sabor, aroma y productividad. En esta última característica destaca la variedad CCN 51 cuya producción cosechada alcanza los 20.5 qq/ha, mientras que el Cacao Nacional produce 4 qq/ha (González, 2012).

2.5.2. Producción nacional

De acuerdo a diversas referencias el puesto de Ecuador varía en cuanto a la producción mundial, sin embargo se encuentra entre los siete principales productores de cacao en el mundo con el 4% de la producción mundial, manteniéndose por lo general por debajo de Costa de Marfil, Ghana e Indonesia (Cacao México, s.f.; Sánchez, 2013). En el país se producen 133323 ton/año de almendra seca de cacao cuyo destino primordial es la exportación y consumo interno. Hasta el año 2012 la superficie total destinada a la siembra de esta especie (dos variedades) fue de 507721 hectáreas principalmente en la Región Costa en las provincias de Guayas, Los Ríos, Esmeraldas y Manabí (abarcan aproximadamente el 70% de la producción de todo el país) (ESIN Consultora, 2014).

En la Figura 11 se presentan los porcentajes de producción de cacao por provincias del Ecuador, donde Guayas se posiciona como el principal productor de cacao en el país. Por otro lado, en la Tabla 1 se aprecian las toneladas anuales de cacao generadas por estas provincias.

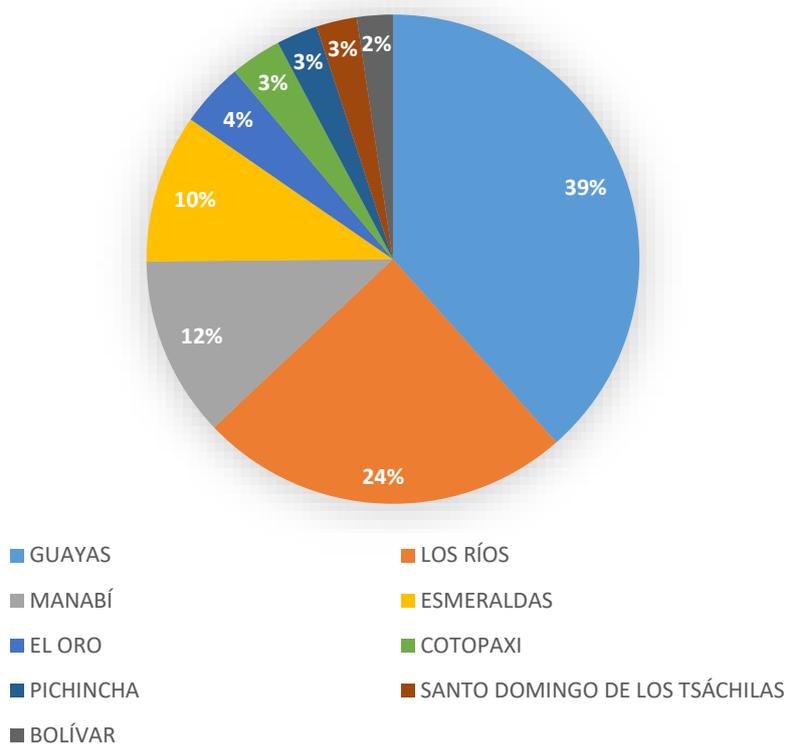


Figura 11. Porcentaje de producción de cacao por provincias.

Adaptado de (ESIN Consultora, 2014).

Tabla 1.

Producción nacional de cacao por provincias.

Provincia	Producción de semillas de cacao (ton/año)
Guayas	57992.64
Los Ríos	36874.68
Manabí	17958.71
Esmeraldas	14815.33
El Oro	6399.33
Cotopaxi	5053.69
Pichincha	4087.72
Pichincha	4087.72
Santo Domingo de los Tsáchilas	4003.58

Bolívar	3558.57
---------	---------

Adaptado de (ESIN Consultora, 2014).

2.5.3. Residuos en la industria cacaoera

En Ecuador la industria cacaoera es responsable de la generación de 2015352.60 toneladas de residuos al año que incluyen principalmente residuos de poda, mazorca descartada y cáscara de mazorca (ESIN Consultora, 2014). En la Tabla 2 se aprecian las toneladas anuales de residuos de la industria cacaoera generadas por provincia. Adicionalmente, en la Tabla 3 se observa la composición química de la cáscara de cacao y se evidencia su alto contenido de carbono y un porcentaje nulo de azufre. La cáscara de la mazorca representa el 90% del fruto y por lo general es arrojada como abono sin pasar por un proceso de compostaje por lo que puede generar la propagación de enfermedades causadas por especies del género *Phytophthora*. Por esta razón se ha buscado diversas utilidades para estos residuos como alimento para animales (uso limitado debido a la presencia de alcaloides en las cáscaras). Además se han buscado usos en actividades investigativas tomando en cuenta la presencia de un pigmento (poliflavonoglucosido) importante para incrementar la resistencia al calor y la luz (Baena y García, 2012); otros ensayos pretenden mejorar las características de ciertos materiales empleando este residuo como en las espumas de poliuretano (Padrón et al., 2004).

Tabla 2.

Producción de residuos de la producción de cacao por provincia.

Provincia	Producción de residuos de la industria cacaoera (ton/año)
Guayas	718018.43
Los Ríos	456552.76
Manabí	222350.38
Esmeraldas	183431.54

El Oro	79231.40
Cotopaxi	62570.80
Pichincha	50610.90
Santo Domingo de los Tsáchilas	49569.16
Bolívar	44059.34

Adaptado de (ESIN Consultora, 2014).



Figura 12. Cáscaras de cacao como abono en los sembríos.

Tomado de (Baena y García, 2012).

Tabla 3.

Composición de los diferentes tipos de cáscara de cacao (% base seca).

Variedad de cáscara de cacao	Carbono C	Hidrógeno H	Oxígeno O	Nitrógeno N	Azufre S
Nacional	42.37	5.29	48.64	1.25	0
CCN 51	41.63	5.45	50.48	0.9	0

Adaptado de (Sánchez, 2013).

2.6. Generación de estiércol por actividades ganaderas en el país

De acuerdo con el Atlas Bioenergético del Ecuador, hasta el 2014 se contaba con 4080167 cabezas de ganado vacuno en el país, siendo Manabí la provincia que lideraba este campo con el 21.4% de posesión de vacunos a nivel nacional. El ganado destinado para la producción de carne genera 9340.61 toneladas de residuos (estiércol) al año, mientras que el ganado vacuno destinado a la producción de leche es el responsable de 857413.15 toneladas de residuos (estiércol) al año (ESIN Consultora, 2014).

Tabla 4.

Cantidad de Ganado vacuno destinado a la producción de carne (cabezas al año) y los residuos de estiércol generados (ton/año) por cada provincia.

Provincia	Cantidad de ganado vacuno (cabezas/año)	Residuos (ton/año)
Manabí	691950	1494.61
Cotopaxi	238587	515.35
Loja	213282	460.69
Azuay	202193	436.74
Pichincha	200860	433.86
Chimborazo	191482	413.60
Guayas	135012	291.63
Esmeraldas	134450	290.41
El oro	105818	228.57
Pastaza	100865	217.87
Santo domingo de los Tsáchilas	98429	212.61
Zamora Chinchipe	92268	199.30
Bolívar	90687	195.88
Cañar	78811	170.23
Tungurahua	67290	145.35

Carchi	54448	117.61
Morona Santiago	46866	101.23
Orellana	24804	53.58

Adaptado de (ESIN Consultora, 2014).

Tabla 5.

Cantidad de Ganado vacuno destinado a la producción de leche (cabezas al año) y los residuos de estiércol generados (ton/año) por cada provincia.

Provincia	Cantidad de ganado vacuno (cabezas/año)	Residuos (ton/año)
Manabí	181016	137427.50
Azuay	128169	97305.90
Pichincha	112388	85324.97
Chimborazo	78219	59383.86
Cotopaxi	75105	57019.72
Tungurahua	64050	48626.76
Cañar	62715	47613.23
Loja	55612	42220.63
Bolívar	49169	37329.10
Guayas	48644	36930.26
Carchi	46823	35548.02
Santo domingo de los Tsáchilas	34372	26095.22
Esmeraldas	31626	24010.46
Morona Santiago	26575	20175.49
Pastaza	26575	20175.49
Zamora Chinchipe	26575	20175.49
Imbabura	21899	16625.72
El oro	19205	14580.45

Los ríos	15945	12105.44
Napo	7991	6066.51
Sucumbíos	7991	6066.51
Orellana	7932	6021.98
Santa Elena	680	516.35

Adaptado de (ESIN Consultora, 2014).

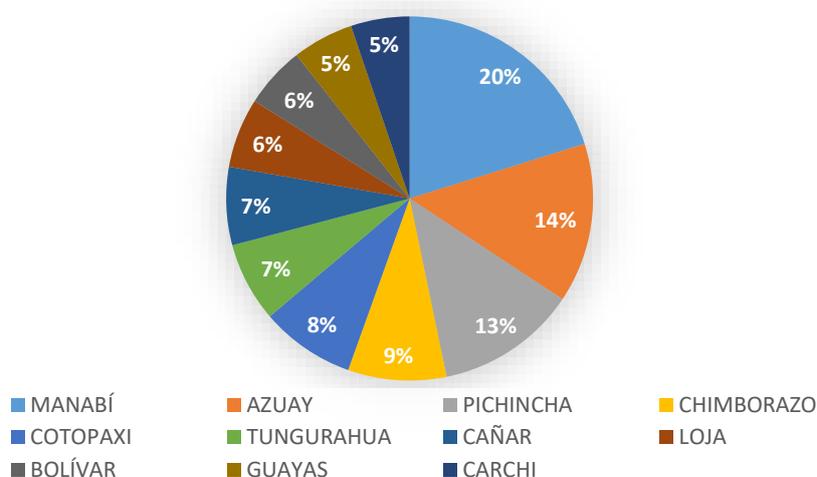


Figura 13. Porcentaje de generación de estiércol de acuerdo a las provincias más representativas.

Adaptado de (ESIN Consultora, 2014).

3. METODOLOGÍA

3.1. Obtención de los residuos (cáscara de cacao y estiércol de vaca)

Las cáscaras de cacao fueron recolectadas en una finca ubicada en la provincia de Esmeraldas, Atacames, parroquia La Unión cuyo producto de comercialización y consumo propio es la variedad de cacao CCN-51 y Cacao Nacional. Se tomaron los residuos correspondientes a diez frutos de Cacao Nacional, fueron guardados en una caja de cartón para su transporte y colocados

en un lugar frío y oscuro para su conservación durante 24 horas antes de su tratamiento.



Figura 14. Residuo correspondiente a un fruto de Cacao Nacional.

Por otro lado, el estiércol de vaca destinado a la elaboración del inóculo fue tomado de la Hacienda Cuendina ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, parroquia Sangolquí. Este lugar se dedica a la producción de leche de forma doméstica, para comercializarla y como consumo propio por lo tanto el ganado posee una dieta específica compuesta principalmente de pasto y libre de químicos. La toma de muestra se realizó cuando el ganado se encontraba en pastoreo (Callaghan, Wase, Thayanithy, y Forster, 1999), se procuró que el estiércol haya sido defecado recientemente por el animal (Macias-Corral et al., 2008) y mediante el uso de guantes se colocaron aproximadamente 800 g del residuo en una funda de basura dejando de lado materiales como piedras o restos de hierba. La muestra fue transportada al laboratorio después de aproximadamente 4 horas del muestreo y se inició el proceso de armado de los inóculos. El estiércol empleado para la elaboración de los test de fermentación (reactores) fue tomado de ganado ubicado en el sector del Deán Bajo, provincia de Pichincha, cantón Quito, parroquia Conocoto. Este ganado es criado de forma doméstica para comercialización de su leche por lo tanto su dieta se basa netamente en el consumo de pasto. Para la toma de muestra se siguió el procedimiento mencionado previamente procurando que la muestra contenga aproximadamente 1500 g del residuo. En este caso se tomó la muestra de dos montones de estiércol dejando de lado materiales como piedras y restos de hierba, todo fue colocado en una funda de basura y se procedió a la mezcla de

dichas muestras. De igual forma, la muestra fue trasladada inmediatamente al laboratorio y fue colocada a 4°C (USEPA, 2001) durante 15 días hasta la preparación de los reactores.

3.2. Preparación de las cáscaras de cacao

Tomando en cuenta las recomendaciones en cuanto al tamaño de partícula óptimo para el proceso de digestión anaerobia, en primer lugar se cortaron las cáscaras de cacao en pequeños cuadrados que fueron colocados en un molino casero (Landers Mora y CIA) para obtener partículas pequeñas.



Figura 15. Cáscaras de cacao tras ser cortadas en cuadrados.



Figura 16. Proceso de molienda de las cáscaras de cacao.

3.3. Determinación de propiedades físicas del estiércol y cáscara de cacao

Para la determinación de sólidos totales y volátiles en los residuos se tomaron en cuenta el Método 1684 de la EPA para sólidos totales, fijos y volátiles en agua, sólidos y biosólidos (USEPA, 2001) y el Método 2540 G del Standard Methods para sólidos totales, fijos y volátiles en muestras sólidas y semi sólidas (APHA/AWWA/WEF, 2012).

3.3.1. Sólidos totales

El análisis de muestras se realizó por triplicado, se colocaron los crisoles dentro de la estufa a 105°C durante 1 hora, después de este tiempo se colocaron los crisoles en un desecador durante 10 minutos, fueron pesados y se colocó 25 g de muestra en cada uno de ellos. Se introdujeron las muestras en la estufa a 105°C durante toda la noche, después de 16 horas se colocaron los crisoles dentro de un desecador durante 10 minutos y finalmente fueron pesados. Se volvieron a colocar los crisoles dentro de la estufa a 105°C durante 30 minutos para verificar que la diferencia de peso entre una medición y la otra sea menor al 4%. Para determinar el porcentaje de sólidos totales se aplicó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ sólidos totales} = \frac{(A-B) \times 100}{C-B} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

A: peso del residuo seco + crisol (g)

B: peso del crisol (g)

C: peso de la muestra húmeda + crisol (g)

3.3.2. Sólidos volátiles

Después del proceso anterior se colocaron los crisoles dentro de la mufla a 550°C durante 4 horas. Después de este tiempo se colocaron los crisoles dentro del desecador durante 10 minutos y posteriormente fueron pesados. Para determinar el porcentaje de sólidos volátiles se aplicó la siguiente ecuación:

$$\% \text{sólidos volátiles} = \frac{(A-D) \times 100}{A-B} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

A: peso del residuo seco + crisol (g)

B: peso del crisol (g)

D: peso del residuo+ crisol después de la ignición (g)

3.3.3. Humedad

Para la determinación de la humedad se empleó el procedimiento para sólidos totales y se aplicó la siguiente fórmula para obtener el porcentaje de humedad:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{(B-A)-(C-A)}{(B-A)} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

A= Peso de la cápsula de porcelana seca y limpia

B= Peso de la cápsula de porcelana + muestra húmeda

C= Peso de la cápsula de porcelana + muestra seca

(Flores, 2014)

3.3.4. Potencial de Hidrógeno (pH)

Tomando en cuenta el método NEMI 45000-H⁺ B se determinó el pH de cada tratamiento y blanco antes y después del proceso de digestión anaerobia mediante un potenciómetro Hanna HI 2210. Para el análisis de pH de los reactores finales se siguió el método 9045D establecido por la Agencia Ambiental de Protección de Estados Unidos (USEPA) en donde se establece que se deben colocar 20 g del lodo proveniente de cada reactor con 20 ml de agua destilada y agitar dicha mezcla manualmente durante 5 minutos (con un agitador de vidrio), se dejó reposar durante una hora hasta obtener un sobrenadante (USEPA, 2004) y se insertó el electrodo de vidrio del potenciómetro en él.

El análisis de pH de cada reactor previo al proceso de digestión anaerobia, en determinados casos (valores de pH menores a 6.5) implicó la agregación de 1 μ l de solución de NaOH con una concentración de 8 ppm, se agitó y se dejó reposar durante una hora y se volvió a medir el pH. En este caso no se realizó el proceso de obtención de sobrenadante pues el volumen líquido de cada reactor tenía 100 ml (cantidad mínima requerida para realizar el procedimiento de cuantificación de biogás o metano) (Angelidaki et al., 2009).

3.4. Obtención del inóculo

Para la preparación del inóculo se empleó una relación agua: estiércol 1:1 (Lam, Heedge, y Eije, 2014; Vögeli, Riu, Gallardo, Diener, y Zurbrügg, 2014) para ello pesaron 350 g de estiércol fresco y se colocaron en un vaso de precipitación, se añadieron 350 ml de agua, fueron mezclados y trasladados a un matraz Erlenmeyer de 1000 ml. Se empleó un tapón de silicona con un agujero en el medio a través del cual se colocó una manguera de un equipo de venoclisis para el desfogue del biogás generado. Este sistema fue colocado dentro de una incubadora a 34°C durante 13 días hasta lograr que la producción de gas sea menor al 5% del total de gas generado en todo el tiempo (Asociación de Ingenieros Alemanes, 2016).



Figura 17. Sistemas armados para la obtención del inóculo.

3.5. Preparación de reactores

Los reactores fueron implementados en matraces Erlenmeyer de 250 ml, donde el volumen líquido fue de 100 ml (50 ml de inóculo y 50 ml de sustrato) (Angelidaki et al., 2009). La parte de sustrato consiste en la proporción de estiércol, cáscara de cacao y agua, para esto se prepararon sustratos con 9% de sólidos totales (tomando en cuenta el rango óptimo entre 8% y 12%) con las siguientes proporciones estiércol-cáscara de cacao 1:1; 2:1 y 1:2 además de un blanco que contenía solo estiércol como sustrato (cada tratamiento y blanco fue realizado por triplicado). Para determinar la cantidad de estiércol y cáscara de cacao en cada tratamiento se emplearon los datos de sólidos totales de cada residuo (a dichos sustratos se colocó agua hasta los 50 ml) y por último se añadieron 50 ml de inóculo en cada matraz. Los cálculos realizados para cada tratamiento y blanco se basaron en las ecuaciones siguientes:

- Blanco

$$\frac{x \times ST_e}{50} = 0.09 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

x = cantidad de estiércol a añadir en 50 ml de solución

0.09 = porcentaje de sólidos totales en los 50 ml de sustrato

50 = volumen (ml) de sustrato

ST_e = porcentaje de sólidos totales del estiércol (sustrato)

- Relación 1:1 Estiércol-Cáscara de cacao (1E:1C)

$$\frac{(x \times ST_e) + (y \times ST_c)}{50} = 0.09 \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$x \times ST_e = y + ST_c \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

y = cantidad de cáscara de cacao a añadir en 50 ml

x = cantidad de estiércol a añadir en 50 ml

ST_e = porcentaje de sólidos totales del estiércol (sustrato)

ST_c = porcentaje de sólidos totales de la cáscara de cacao (sustrato)

0.09 = porcentaje de sólidos totales en los 50 ml de sustrato

50 = volumen (ml) de sustrato

- Relación 1:2 Estiércol-Cáscara de cacao (1E:2C)

$$\frac{(x \times ST_e) + (y + ST_c)}{50} = 0.09 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$2(x \times ST_e) = y + ST_c \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

y = cantidad de cáscara de cacao a añadir en 50 ml

x = cantidad de estiércol a añadir en 50 ml

ST_e = porcentaje de sólidos totales del estiércol (sustrato)

ST_c = porcentaje de sólidos totales de la cáscara de cacao (sustrato)

0.09 = porcentaje de sólidos totales en los 50 ml de sustrato

50 = volumen (ml) de sustrato

- Relación 2:1 Estiércol-Cáscara de cacao (2E:1C)

$$\frac{(x \times ST_e) + (y + ST_c)}{50} = 0.09 \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$x \times ST_e = 2(y + ST_c) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

y = cantidad de cáscara de cacao a añadir en 50 ml

x = cantidad de estiércol a añadir en 50 ml

ST_e = porcentaje de sólidos totales del estiércol (sustrato)

ST_c = porcentaje de sólidos totales de la cáscara de cacao (sustrato)

0.09 = porcentaje de sólidos totales en los 50 ml de sustrato

50 = volumen (ml) de sustrato

Los matraces fueron cerrados con tapones de silicona y para asegurar la hermeticidad del sistema se colocó parafilm, en medio de cada tapón se introdujo una aguja hipodérmica perteneciente a un equipo de venoclisis, las mangueras de este equipo fueron empleadas para la salida del biogás y la cuantificación de metano.

Todos los reactores fueron colocados en una incubadora a 34°C (Montes, 2008) durante 47 días (Carlin, 2015) y cada 6 días se realizaba agitación manual de todos los sistemas durante 1 minuto para evitar la formación de costras y lograr la homogenización del material (Morales, 2018).



Figura 18. Sistemas de biodigestión dentro de la incubadora.

3.6. Sistema de medición de metano

Para la cuantificación diaria de metano se empleó el método de desplazamiento volumétrico para lo cual se colocaron probetas invertidas de 100 ml dentro de vasos de precipitación con una solución de NaOH 2M que capta el CO₂ generado en el biogás y deja pasar solo el CH₄ para poder cuantificarlo como se observa en la Figura 19 (Salazar y Quirós, 2017; BioProcess Control, 2014; López, 2007). Las mangueras de los equipos de venoclisis de cada reactor fueron colocadas dentro de cada probeta y de esa forma se determinó la cantidad de NaOH desplazado (proporcional al volumen de metano producido) diariamente empezando por el cuarto día (después de armar los reactores). En la Figura 20 se aprecia el sistema de cuantificación de metano armado. Las mediciones fueron realizadas de lunes a sábado alrededor de las 10 a.m. Para reportar los resultados, se sumaron 250 ml (de metano) en el primer día que cada reactor registró medición de metano, debido a que el volumen que ocupaba el gas en cada matraz Erlenmeyer correspondía al valor mencionado.

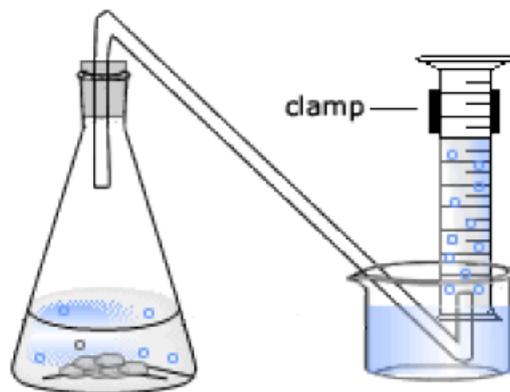


Figura 19. Esquema del sistema de cuantificación de metano. Tomado de (Ellesmere, 2015).



Figura 20. Sistemas de cuantificación de metano.

3.7. Transformación de resultados a condiciones normales (CN)

La presión y temperatura ambiente fueron registradas en el momento de medición, con dichos datos se transformó el volumen de metano generado a condiciones normales (0°C y 1 atm) empleando la siguiente fórmula:

$$V_o = \frac{V \times P \times T_o}{P_o \times T} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

V_o = Volumen a condiciones normales (l)

V = Volumen registrado cada día de medición (l)

P = Presión registrada cada día de medición (atm)

T = Temperatura registrada cada día de medición (K)

T_o = Temperatura a condiciones normales (K)

P_o = Presión a condiciones normales (atm)

(Drosg, Braun, Bochmann, y Al Saedi, 2013)

3.8. Determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica

Para determinar la eficiencia de remoción de sólidos totales y volátiles se empleó la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia de remoción de sólidos (\%)} = \frac{S_i - S_f}{S_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

S_i = Cantidad de sólidos iniciales (g de sólidos/g de muestra)

S_f = Cantidad de sólidos finales (g de sólidos/g de muestra)

4. RESULTADOS

4.1. Inóculo

4.1.1. Potencial de Hidrógeno

El pH inicial de los inóculos preparados fue de 7.5 en ambos casos por lo tanto no fue necesario el uso de NaOH para regularlo. Por otro lado el pH después de 13 días del proceso de digestión anaerobia fue de 5.35.

4.1.2. Producción de metano

La producción de metano hasta el día 13 fue de 206 ml de metano, en ese día se generaron 11 ml (que representa el 5.3% del total de metano generado hasta ese día).

Tabla 6.

Producción diaria de metano (ml) por parte del inóculo.

Día	Volumen (ml)
1	0
6	45
7	30
8	33
9	25
10	22
11	22

12	18
13	11

4.1.3. Sólidos totales y volátiles

Los sólidos totales del inóculo después del proceso de digestión anaerobia corresponden al 7%, mientras que los sólidos volátiles corresponden a un 81% de los sólidos totales.

4.2. Cantidad de sustrato en cada reactor

La cantidad (en gramos) de cáscara de cacao y estiércol añadida en cada reactor se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7.

Cantidad de cáscara de cacao (g) y estiércol de vaca (g) añadidos en cada reactor.

Reactor	Cantidad de cáscara de cacao (g)	Cantidad de estiércol (g)
Blanco	-	27.35
1E:1C	10.73	13.67
1E:2C	14.30	9.12
2E:1C	7.15	18.23

4.3. Propiedades físicas de la materia orgánica

4.3.1. Propiedades físicas de la materia orgánica antes de la digestión anaerobia

4.3.1.1. Sólidos totales, volátiles y humedad

En la Tabla 8 se evidencian los porcentajes de sólidos totales, sólidos volátiles y humedad de cada sustrato. Adicionalmente se presentan los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles determinados en el inóculo.

Tabla 8.

Propiedades físicas de los sustratos e inóculo.

	Estiércol de vaca	Cáscara de cacao	Inóculo
Sólidos totales (%)	16.5%	21%	7%
Sólidos volátiles (%)	72.3%	84%	81%
Humedad (%)	83.5%	79%	

Tomando en cuenta que la fase de sustrato de cada reactor contenía un 9% de sólidos totales y a la fase de inóculo le correspondía 7% de sólidos totales, se determinó que la condición inicial de todos los reactores fue de 8% de sólidos totales.

En la Tabla 9 se presentan los porcentajes de sólidos volátiles existentes en cada reactor.

Tabla 9.

Porcentaje de sólidos volátiles en cada reactor.

Reactor	% Sólidos volátiles
Blanco	6.14%
1E:1C	6.40%
1E:2C	6.49%
2E:1C	6.31%

4.3.1.2. Potencial de Hidrógeno de cada reactor

En la Tabla 10 se establecen los valores de potencial de hidrógeno de cada reactor antes y después de ser regulados mediante la solución de hidróxido de sodio.

Tabla 10.

pH de cada reactor antes y después de regularlo.

Reactor	Repetición	pH antes de regularlo	pH después de regularlo
Blanco	1	6.6	sin regulación
	2	6.8	sin regulación
	3	6.3	sin regulación
1E:1C	1	5.3	5.94
	2	5.2	6.1
	3	5.3	6.0
1E:2C	1	4.95	5.94
	2	4.98	5.98
	3	4.97	5.92
2E:1C	1	5.5	6.01
	2	5.7	6.14
	3	5.5	6.16

4.3.2. Propiedades físicas de la materia orgánica después de la digestión anaerobia

4.3.2.1. Sólidos totales y volátiles

La Tabla 11 presenta los valores para sólidos totales y volátiles después del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 11.

Porcentaje de sólidos totales y volátiles en cada reactor después de la digestión anaerobia.

Reactor	Repetición	Sólidos totales	Sólidos volátiles (con respecto a ST)	Sólidos volátiles (con respecto a toda la muestra)
Blanco	1	6%	71.40%	4.6%
	2	6%	70.97%	4.5%
	3	7%	71.20%	4.7%
1E:1C	1	6%	78.50%	4.9%
	2	6%	76.14%	4.9%
	3	6%	75.69%	4.2%
1E:2C	1	7%	79.68%	5.9%
	2	7%	81.80%	6.0%
	3	7%	81.93%	5.5%
2E:1C	1	7%	74.36%	4.9%
	2	8%	56.34%	4.5%
	3	7%	75.47%	5.0%

4.3.2.2. Porcentaje de remoción de sólidos totales y volátiles

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos de la eficiencia de remoción de sólidos en cada tratamiento y el Blanco.

Tabla 12.

Porcentaje de remoción de sólidos totales y volátiles.

Reactor	Repetición	Porcentaje de remoción de ST	Porcentaje de remoción de SV
Blanco	1	20%	25%
	2	22%	27%

	3	18%	24%
1E:1C	1	23%	24%
	2	20%	24%
	3	30%	34%
1E:2C	1	7%	9%
	2	9%	7%
	3	17%	16%
2E:1C	1	18%	23%
	2	1%	29%
	3	18%	22%

4.3.2.3. Potencial de Hidrógeno de cada reactor

En la Tabla 13 se observan los resultados del pH de cada reactor después del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 13.

pH de cada reactor después de la digestión anaerobia.

Reactor	Repetición	pH
Blanco	1	7.0
	2	7.3
	3	7.1
1E:1C	1	7.3
	2	7.4
	3	7.4
1E:2C	1	5.3
	2	5.3
	3	7.0
2E:1C	1	7.3
	2	7.4
	3	7.4

4.4. Cantidad de metano producido

En la Tabla 14 se observa la producción acumulada de metano por parte de cada reactor durante 47 días a temperatura y presión de Quito, y a condiciones normales de temperatura y presión. Por otro lado la Figura 21 evidencia la producción acumulada de metano estimada de manera diaria (a condiciones normales de temperatura y presión).

Tabla 14.

Cantidad acumulada de metano (ml) generada en 47 días a temperatura y presión de Quito y a condiciones normales de presión y temperatura.

Reactor	Repetición	ml de producción total de metano (Temperatura y Presión de Quito)	ml de producción de metano (CN)
Blanco	1	763	721.67
	2	407	382.69
	3	766	723.56
1E:1C	1	1130	1070.76
	2	1134	1073.80
	3	0	0.00
1E:2C	1	365	343.69
	2	376	353.85
	3	384	362.17
2E:1C	1	432	405.69
	2	295	277.40
	3	294	276.54

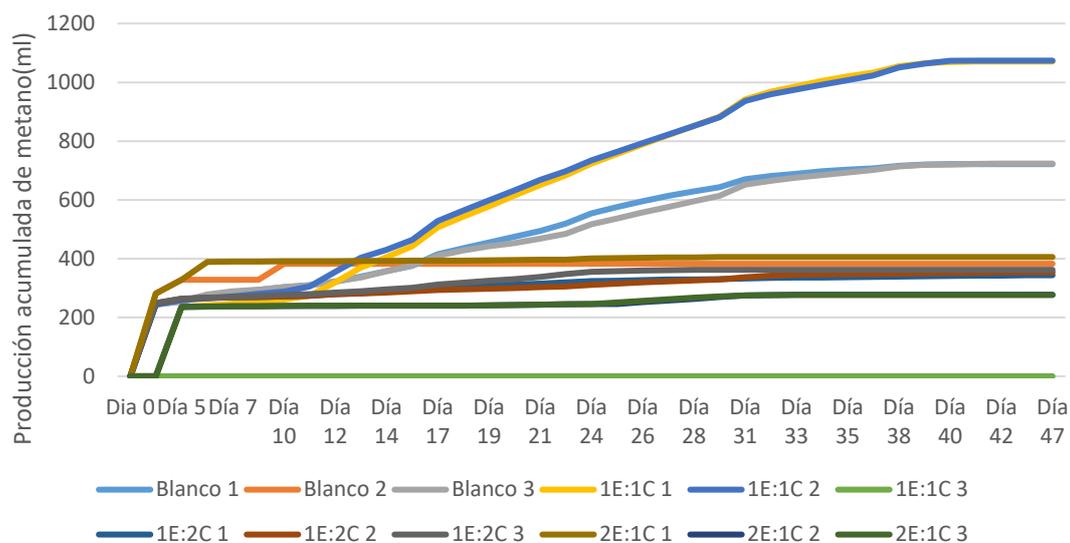


Figura 21. Producción acumulada de metano (ml) a condiciones normales de temperatura y presión.

La Tabla 15 presenta el rendimiento de metano (litros de metano/kilogramos de sólidos volátiles) de cada reactor a temperatura y presión de Quito, y a condiciones normales de temperatura y presión. Adicionalmente se puede observar los valores diarios de rendimiento de metano en las mismas unidades (a condiciones normales de temperatura y presión) en la Figura 22.

Tabla 15.

Rendimiento de metano de cada tratamiento y blanco a temperatura y presión de Quito y a condiciones normales (al final de la digestión anaerobia).

Reactor	Repetición	l de metano/ kg de sólidos volátiles	l de metano/ kg sólidos volátiles (CN)
Blanco	1	124.3	117.56
	2	66.3	62.34
	3	124.8	117.87
1E:1C	1	176.5	167.23
	2	177.1	167.71

	3	0.0	0.00
1E:2C	1	56.2	52.95
	2	57.9	54.52
	3	59.2	55.80
	1	68.4	64.24
2E:1C	2	46.7	43.93
	3	46.6	43.79

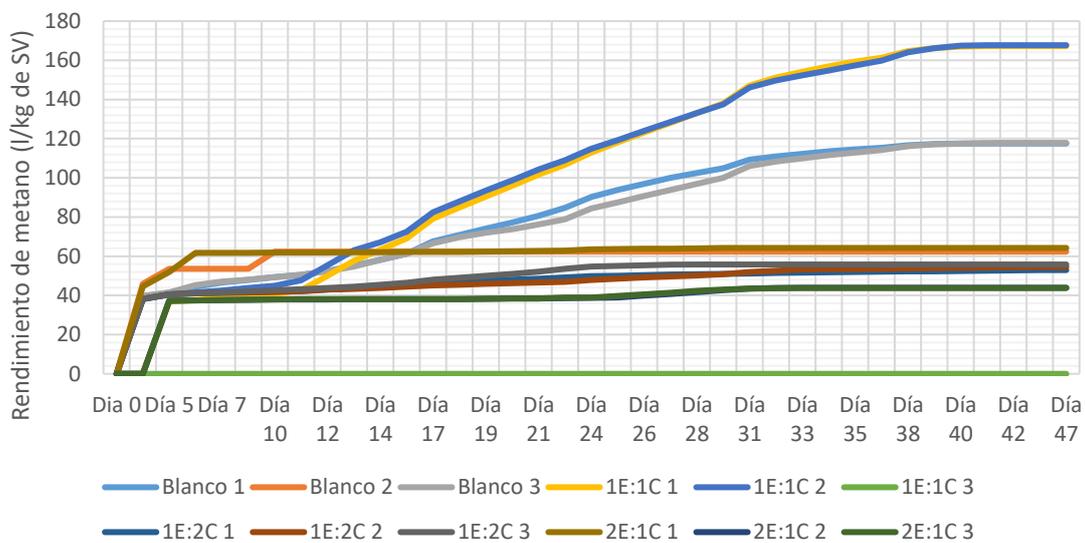


Figura 22. Rendimiento de metano (l/kg de sólidos volátiles) (a condiciones normales de temperatura y presión) del blanco y tres tratamientos con diferentes proporciones de estiércol y cáscara de cacao.

Los valores obtenidos de la medición de metano deben tener un máximo de 15% de variación entre repeticiones, en caso de que se supere este porcentaje, dicho reactor debe ser descartado de los análisis (Asociación de Ingenieros Alemanes, 2016). Por lo tanto los promedios de generación acumulada de metano se obtuvieron descartando las siguientes repeticiones que no cumplían con la condición antes mencionada: Blanco (2), 1E:1C (3) y 2E:1C (1). Dichos valores promedio se ven reflejados en la Tabla 16 y en la Figura 23.

Tabla 16.

Generación y rendimiento promedio de metano de cada tratamiento a temperatura y presión de Quito y a condiciones normales.

Reactor	Promedio (ml de metano totales producidos a presión y temperatura de Quito)	Promedio (ml de metano totales producidos a condiciones normales)	Promedio de rendimiento de metano a condiciones normales (l/kg SV)
Blanco	764.5	722.61	117.72
1E:1C	1132	1072.28	167.47
1E:2C	375.00	353.24	54.42
2C:1E	294.5	276.97	43.86

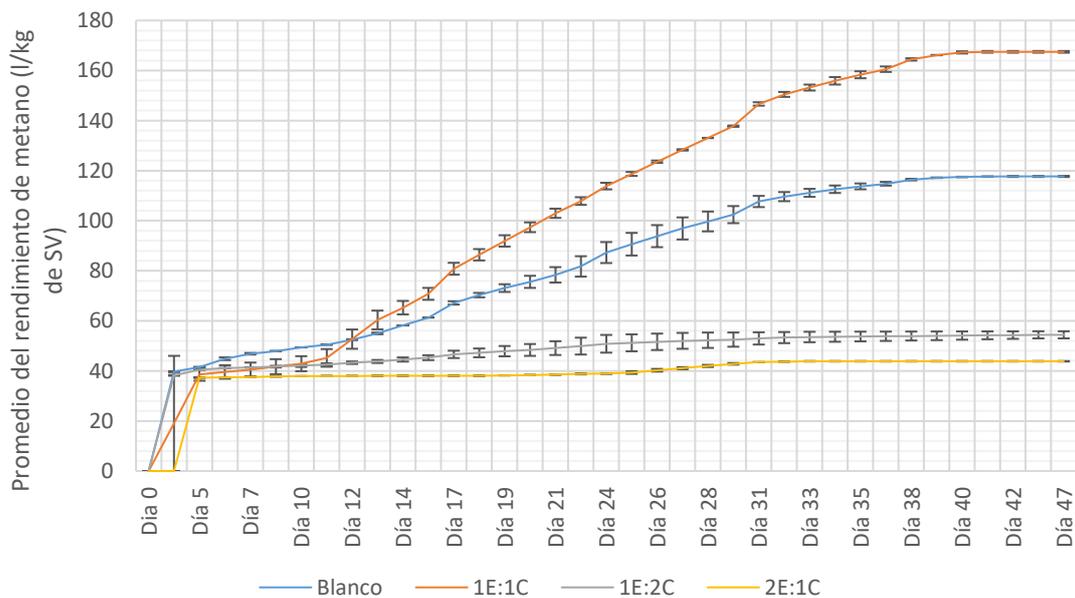


Figura 23. Promedio del rendimiento de metano a condiciones normales (l/kg de sólidos volátiles) de cada tratamiento y Blanco.

5. DISCUSIÓN

Las curvas del promedio de rendimiento de metano a condiciones normales de presión y temperatura (Figura 23) al ser comparados con las curvas de la Figura 24, evidencian que el Blanco tiene un proceso normal de degradación, mientras que los tratamientos con diferentes proporciones de cáscara de cacao presentan una curva que corresponde a una degradación retardada (Drosg et al., 2013) en donde intervienen sustancias que se degradan con dificultad (Asociación de Ingenieros Alemanes, 2016).

De acuerdo a fuentes bibliográficas y los resultados obtenidos, la cáscara de cacao contiene entre 79% a 85% de humedad (Ortiz y Álvarez, 2015; Sánchez, 2013), siendo el agua el componente más abundante en dicho residuo, seguido de la cantidad de carbohidratos que representan un 7.05%, (Ortiz y Álvarez, 2015) por lo tanto, presenta condiciones adecuadas para ser empleada en el proceso de degradación anaerobia. Sin embargo, este proceso podría ser inhibido o retardado debido al contenido de lignina en la cáscara de cacao (alrededor de 27% en peso seco) (Redgwell et al., 2002). En ese sentido, sería idóneo un pretratamiento físico, químico o biológico en la cáscara de cacao tomando en cuenta que este se presenta como un residuo lignocelulósico similar a la cáscara de la jaca (*Artocarpus heterophyllus*) cuyo aprovechamiento puede basarse en procesos anaerobios (Medina et al., 2018). Algunos de los pretratamientos para residuos lignocelulósicos destinados a la generación de alcoholes y biogás son el uso de ácido sulfúrico diluido, hidróxido de sodio, agua líquida caliente, explosión de vapor, entre otros (Zheng, Zhao, Xu, y Li, 2014). El uso de NaOH en el pretratamiento de biomasa lignocelulósica se presenta como un método prometedor, en especial a escala industrial, que es capaz de incrementar hasta en un 89% la producción de biogás (Pei et al., 2014).

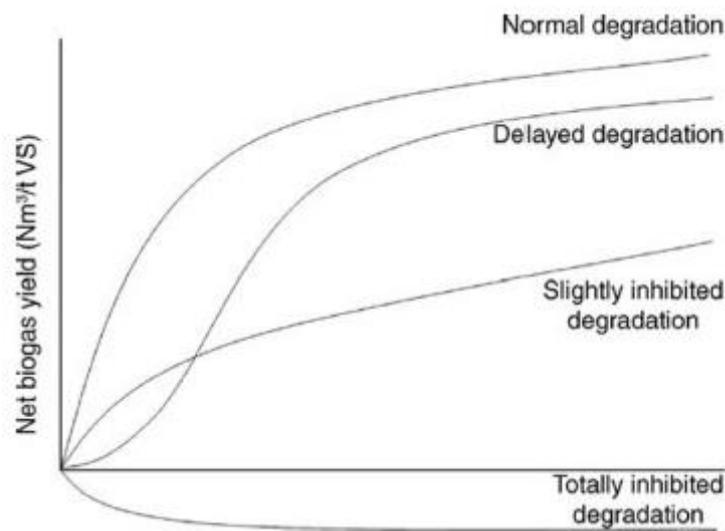


Figura 24. Ejemplos de curvas de potencial de metano.

Tomado de (Drosg et al., 2013).

El tratamiento conformado por Estiércol- Cáscara de cacao en relación 1:1 fue el único que superó la producción de metano del Blanco. Las condiciones finales de este tratamiento ratifican su alta generación de metano pues todas las repeticiones empleadas para el reporte de resultados presentaron un pH con valores de 7.3; 7.4 y 7.4, que son muy cercanos a la neutralidad y muy recomendados para un adecuado desarrollo del proceso de digestión anaerobia (González et al., 2008; Montes, 2008). Además la eficiencia de remoción de sólidos volátiles de este tratamiento fue superior a los demás alcanzando un valor promedio de 27%. Este valor está por debajo de lo reportado en la digestión anaerobia de residuos de alimentos con estiércol de vaca en proporciones similares, en donde se reporta una eficiencia de remoción del 60%. Sin embargo, en dicho caso, al emplear residuos de alimentos con una mayor cantidad y variedad de microorganismos, el proceso de biodigestión tiende a acelerarse (Carlin, 2015). La temperatura (34°C) es una de las variables comunes empleadas en dicho estudio y la presente investigación, este factor fue seleccionado tomando en cuenta el valor óptimo, dentro del rango mesofílico, para un adecuado crecimiento de microorganismos metanogénicos (Cendales, 2011). Adicionalmente se tomó en cuenta la temperatura ambiente con la que cuentan las principales provincias donde se desarrollan los cultivos de cacao con

la finalidad de que no exista la necesidad de emplear fuentes alternas que proporcionen temperatura al sistema, dichas zonas cuentan con temperaturas que fluctúan entre los 25°C a 32°C (llegando incluso a superar este límite en épocas calurosas (Gobierno Autónomo Descentralizado de la Parroquia Pueblo Nuevo, 2019; Prefectura de Esmeraldas, 2015). La Figura 25 presenta la influencia de la temperatura en la razón máxima de crecimiento de los microorganismos metanogénicos y se observa que dentro del rango mesofílico la temperatura óptima se encuentra alrededor de los 35°C.

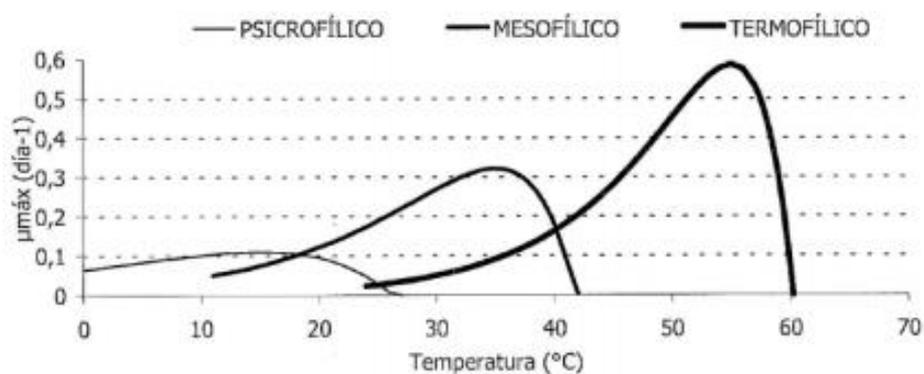


Figura 25. Influencia de la temperatura sobre la razón máxima de crecimiento de los microorganismos metanogénicos.

Tomado de (Cendales, 2011).

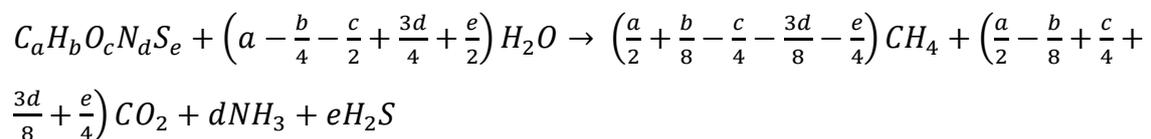
El tratamiento que poseía relaciones iguales de estiércol y cáscara de cacao (1E:1C) logró producir 1072.28 ml de metano a condiciones normales de temperatura y presión durante 47 días, el rendimiento promedio de metano para el mismo tratamiento fue de 167.47 litros de metano/kg de sólidos volátiles. Dicho valor se encuentra por debajo de lo reportado por Carlin (2015) que emplea residuos de alimentos como sustrato de estiércol de vaca, presentando un valor aproximado de 350 l/kg de sólidos volátiles. Por otro lado, la codornaza en co-digestión con la cáscara de banano a proporciones iguales a las del tratamiento en cuestión (1E:1C) presenta una producción total de metano de aproximadamente 225 ml a condiciones normales de presión y temperatura durante 12 días de digestión anaerobia, además se muestra que el rendimiento de metano es de 117 l/kg de sólidos volátiles (Salazar y Quirós, 2017)

demostrando cercanía con los valores obtenidos en el presente estudio, tomando en cuenta la similitud de ambos residuos comparados (cáscara de banano y cáscara de cacao).

Las razones de baja producción de metano en comparación con otros reportes puede darse debido a diversas razones, es importante mencionar que los 3 primeros días después de que los reactores fueron armados no se pudo cuantificar la cantidad de metano generado por lo tanto se podría determinar, mediante otros ensayos, la cantidad aproximada que no fue cuantificada en dicho periodo de tiempo. Es decir que el rendimiento de metano para el tratamiento Estiércol: Cáscara de cacao en relación 1:1 pudo tomar un valor alrededor de 137.6 l/kg de sólidos volátiles tomando en cuenta que los tres primeros días corresponden entre el 10% al 15% del rendimiento total de metano en un proceso de digestión anaerobia (Carlin, 2015; Mukumba, Makaka, y Mamphweli, 2016; Sahito, Mahar, y Ahmed, 2014; Zambrano, 2016).

Por otro lado, en muchos casos se toma como inóculo lodos de aguas residuales estabilizados anaeróbicamente. Sin embargo, para la digestión anaerobia de sustratos especiales, como el caso de desechos vegetales, se recomienda tomar como inóculo el sustrato digerido de un biodigestor en funcionamiento que contenga un material similar al que será motivo de investigación (Drosg et al., 2013). También es recomendable emplear bacterias termofílicas anaerobias para mejorar el rendimiento de un biodigestor pero la alta temperatura requerida para que sobrevivan (alrededor de 65°C) implica un elevado costo para el proceso (Rivas, Faith, y Guillén, 2011). Por lo tanto es importante una adecuada selección del inóculo a ser empleado para reducir el tiempo de estabilización de los biodigestores (Enríquez y Jurado, 2016). Debido a la baja aplicación y acceso a este tipo de tecnología en lugares aledaños a la zona de realización del estudio sumado a la escasez de biodigestores que emplean cáscara de cacao (o residuos similares) como sustrato limitó a la presente investigación el uso de un inóculo obtenido de un biodigestor estabilizado, pero en su lugar, el uso de estiércol de vaca como inóculo también es recomendado (Rivas et al., 2011; Vögeli et al., 2014)

Tomando en cuenta el tratamiento que superó al blanco, se determinó que el aporte del cacao a la producción de metano es un estimado de 49.75 l/kg de sólidos volátiles que al ser comparado con la producción teórica (310 l/kg de sólidos volátiles) se aprecia una amplia brecha entre los dos valores. El valor teórico fue obtenido mediante la reacción desarrollada por Buswell y Hatfield en 1936 en donde se toma en cuenta el contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno de un sustrato para determinar la cantidad de metano y dióxido de carbono que podría generarse (Achinas y Euverink, 2016; Drosch et al., 2013), esta ecuación fue modificada por Boyle en 1952, quien incluyó la cantidad de nitrógeno y azufre del sustrato para establecer la producción de amoníaco y sulfuro de hidrógeno. La reacción empleada se detalla a continuación:



(Achinas y Euverink, 2016).

La reacción empleada para calcular el valor teórico asume la generación de alrededor de un 80% de metano y aproximadamente un 20% de dióxido de carbono, sin embargo el porcentaje de metano puede variar entre el 55 y 70% del total del biogás dependiendo del material digerido (MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF, 2011). Por lo tanto en el peor escenario (55% de metano) se podría estimar un valor teórico de 170. 5 litros de metano/ kg de sólidos volátiles. A pesar de que este valor es mucho más cercano a la producción experimental de metano de la cáscara cacao, ambos datos siguen presentando una importante diferencia que puede deberse a los factores ya mencionados que alteran la producción de metano en un reactor (uso del inóculo adecuado, temperatura, pH, tiempo de acondicionamiento de un reactor, etc).

En cuanto a la eficiencia de remoción de sólidos, los valores promedio analizados fueron calculados empleando todas las repeticiones de cada reactor y se observó que el tratamiento que presentó mayor producción de metano (1E:1C) fue el que

evidenció el mayor porcentaje de remoción de sólidos totales y volátiles con valores promedio de 24% y 27% respectivamente.

Por otro lado, el tratamiento 1E:2C fue el que presentó los menores porcentajes de remoción de sólidos totales y volátiles (promedio de 11% en ambos casos). En dos de las repeticiones de este tratamiento (1E:2C), se presentó un pH de 5.3 al finalizar el proceso de digestión anaerobia, en dichos casos los porcentajes de remoción de sólidos volátiles fueron de 9% y 7%. En la tercera repetición del tratamiento mencionado, se evidenció un pH después de la digestión anaerobia de 7, y una eficiencia de remoción de sólidos volátiles del 16%. En este caso existe un porcentaje de remoción de sólidos más elevado que en las otras repeticiones pero a pesar de esto sigue por debajo de los resultados de remoción de sólidos volátiles obtenidos en los otros tratamientos y el Blanco.

A pesar de que dicho tratamiento fue el que presentó la menor eficiencia en remoción de materia orgánica, fue el tercero en la producción de metano. Por lo tanto, las repeticiones que presentaron un pH bajo al final del proceso, sufrieron un decaimiento del pH después de generar una cantidad determinada de metano (que fue cuantificada) pues aproximadamente hasta el día 17 se evidencia una producción creciente de metano y a partir de este día existe un decrecimiento notable en la generación de este gas, que puede ser causado por la inhibición de las bacterias metanogénicas (Vögeli et al., 2014). Trabajar con un pH ácido disminuye la producción de metano (Parra et al., 2014) y cuando los reactores cuentan con un pH por debajo de 6.8 se recomienda descartar estos ensayos (Asociación de Ingenieros Alemanes, 2016), por lo tanto es imprescindible excluir este tratamiento para futuras experimentaciones.

En cuanto al potencial de hidrógeno se observó que todos los reactores (a excepción del Blanco) presentaron la necesidad de regular su pH antes de la digestión anaerobia, después de este proceso de regulación de pH se alcanzaron valores cercanos al 6 que se encuentra dentro del rango admisible para el proceso de digestión anaerobia (Montes, 2008). Gracias a esta regulación previa del potencial de hidrógeno se logró que la mayoría de los tratamientos cuenten, después de 47 días, con un pH idóneo, alrededor de 7. Sin embargo, como ya

fue mencionado, después de la digestión anaerobia, las repeticiones 1 y 2 del tratamiento con relación 1:2 de Estiércol: Cáscara de cacao (1E:2C) presentaron un potencial de hidrógeno de 5.3 cuya razón principal puede deberse a una sobrecarga del sistema propiciando la inhibición de la actividad metanogénica de los microorganismos para remover hidrógeno y ácidos orgánicos volátiles causando una disminución en el pH del sistema que también puede desencadenar en problemas en las fases de hidrólisis y acidogénesis (Siegert y Banks, 2005; Wang, Yin, Shen, y Li, 2014).

Finalmente, de acuerdo al análisis estadístico realizado, donde se tomó en cuenta el rendimiento de metano a condiciones normales (l/kg SV) por cada tratamiento y el Blanco (a condiciones normales de temperatura y presión). Se comprobó la normalidad de los datos y empleando un análisis de varianza (ANOVA) se obtuvo un valor p de 0.0024 (menor al nivel de significancia de 0.05) con lo cual se determinó que entre los tratamientos y el Blanco sí existe una diferencia significativa. Adicionalmente, empleando una prueba Tukey, se identificó que el Blanco, estadísticamente, presenta características similares a los tres tratamientos (1E:1C; 1E:2C; 2E:1C). Además, se corroboró que el mejor tratamiento para la producción de metano es la proporción 1:1 de Estiércol: Cáscara de cacao como se puede apreciar en la Tabla 17.

Tabla 17.

Análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey con los tratamientos y Blanco.

Variable	N	R²	R² Aj	CV
LN Rendimiento de metano (CN)	11	0.86	0.80	5.29

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.27	3	0.76	14.41	0.0022
Tratamiento	2.27	3	0.76	14.41	0.0022
Error	0.37	7	0.05		
Total	2.64	10			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.65718

Error:0.0526 gl:7

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
3	3.91	3	0.13	A	
2	4.00	3	0.13	A	
0	4.56	3	0.13	A	B
1	5.12	2	0.16		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$)

Nota: Los números fueron asignados para facilidad de evaluación de la siguiente manera:

0. Blanco
1. 1E:1C
2. 1E:2C
3. 2E:1C

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se demostró que el uso de cáscara de cacao para la producción de biogás puede darse siempre y cuando existan las condiciones óptimas de tratamiento. Es importante asignarle un uso al principal residuo generado de la industria cacaotera (cáscara), en ese sentido, se determinó que la proporción óptima para la generación de metano es aquella que contenía 50% de estiércol de vaca y 50% cáscara de cacao en peso seco (1E:1C). Este tratamiento contaba con una concentración de sólidos totales del 8% (tomando en cuenta el inóculo) y fue sometido durante 47 días a una temperatura de 34°C. A pesar de que este tratamiento fue el que generó mayor cantidad de metano (167.47 l/kg de sólidos volátiles), los datos arrojados se encuentran bajo los datos experimentales encontrados en investigaciones similares. Esto puede darse debido a uno o varios de los parámetros que afectan la digestión anaerobia como son: pH, temperatura, tiempo del proceso de biodigestión, y cantidad y calidad del inóculo. Adicionalmente, en este tratamiento se evidenció la eficiencia más alta de remoción de materia orgánica, se alcanzó un porcentaje de remoción promedio de sólidos de totales del 24% y sólidos volátiles del 27%, revelando la necesidad de optimización del proceso e incremento en el tiempo del mismo, pues dichos datos se encuentran alejados de valores experimentales encontrados en investigaciones similares. Es importante mencionar que, hasta el momento, no se han desarrollado investigaciones que empleen la cáscara de cacao para producción de biogás por lo tanto las comparaciones mencionadas se han realizado empleando estudios con residuos similares (residuos de alimentos, cáscara de banano, estiércol). Por otro lado, la regulación del pH antes del proceso de digestión anaerobia fue importante para evitar la acidificación del medio e inhibición de la producción de metano y para este fin, la solución de NaOH no presentó problemas en su uso pues todas las unidades experimentales (a excepción del tratamiento 1E:2C) mantuvieron un pH neutro hasta el final del proceso.

6.2. Recomendaciones

La reducción de tamaño de las partículas de cáscara de cacao para incrementar la eficiencia del tratamiento fue un parámetro importante, para una escala industrial, se recomienda la aplicación de pretratamientos mecánicos similares de reducción de tamaño de partícula, y adicionalmente se podrían desarrollar estudios que implementen los pretratamientos químicos o biológicos para residuos con lignina, como es el caso de la cáscara de cacao.

Debido a la dificultad de acceso a tecnologías de medición más precisas, en esta investigación se empleó un método de desplazamiento volumétrico para la cuantificación de biogás. Sin embargo, para la obtención de datos más precisos se recomienda el uso de aparatos destinados especialmente a la medición de biogás o metano. Además, uno de los aspectos más importantes en el arranque de un biodigestor es el inóculo, de esa manera, se recomienda iniciar con materia orgánica similar a la que vaya a ser tratada en el biodigestor de estudio y en caso de que no exista dicha posibilidad se puede recurrir al estiércol.

Finalmente, el uso de cáscara de cacao como cosustrato del estiércol de vaca para la generación de metano y producción de energía puede ser potencializado, principalmente en Manabí tomando en cuenta la cantidad generada de ambos residuos. Por lo tanto para lograr una importancia significativa a nivel industrial, se recomienda continuar con las investigaciones que potencien a la cáscara de cacao como un medio de producción de biogás.

REFERENCIAS

- Achinas, S., y Euverink, G. J. W. (2016). *Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. Resource-Efficient Technologies*, 2(3), 143–147. <http://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.08.001>
- Acosta, Y., y Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 39(1), 35–48. <http://doi.org/0138-6204>
- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2017). Mitigación del cambio climático. Recuperado el 6 de julio de 2018 de <https://www.eea.europa.eu/es/themes/climate/intro>
- Agro Waste. (2013). Digestión Anaerobia. *Livestock Research for Rural Development*, 1–10. Recuperado el 8 de septiembre de 2018 de <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/DIGESTION-ANAEROBIA.pdf>
- Amay, E., y López, E. (2015). Estimación del impacto del cambio climático en la calidad del agua para la Cuenca del Río Tomebamba en Monay. Universidad de Cuenca. Recuperado el 15 de mayo de 2018 de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21701/1/TESIS.pdf>
- Anecacao. (2015). Cacao Nacional. Recuperado el 13 de agosto de 2018 de <http://www.anecacao.com/es/quienes-somos/cacao-nacional.html>
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., ... Van Lier, J. B. (2009). *Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. Water Science and Technology*, 59(5), 927–934. <http://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- APHA/AWWA/WEF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Standard Methods*, 541. <http://doi.org/ISBN9780875532356>
- Apolo, A. (2015). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anarobio prototipo de bajo costo. Universidad San Francisco de Quito.

- Recuperado el 18 de septiembre de 2018 de repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/4768/1/121002.pdf%0A
- APRIM. (s.f.). Cacao. Recuperado el 4 de agosto de 2018 de <http://www.manabi.gob.ec/investmanabi/Exportaciones.php>
- Asociación de Ingenieros Alemanes. (2016). *Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche*.
- Baena, L., y García, N. (2012). Obtención y caracterización de fibra dietaria a partir de cascarilla de las semillas tostadas de Theobroma cacao L. de una industria chocolatera colombiana. Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado el 19 de agosto de 2018 de <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/textoyanexos/66392B139.pdf>
- Banco Mundial. (2017). Emisiones de CO2 (kt). Recuperado el 5 de febrero de 2018 de <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT>
- Barrera, L. (2017). Diseño y montaje de un prototipo a escala laboratorio para el análisis de procesos de biodigestión a partir de diversos residuos de biomasa. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Recuperado el 24 de septiembre de 2018 de <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/2678>
- BioProcess Control. (2014). *Discover the benefits of the Methane potential analysis made easier*. Recuperado el 15 de junio de 2018 de <http://www.bioprocesscontrol.com/en/products/ampts/>
- Botero, R. (2011). Biodigestores de bajo costo. Recuperado el 6 de noviembre de 2018 de <https://bioreactorcrc.wordpress.com/author/bioreactorcrc/page/2/>
- Cacao México. (s.f.). Principales países productores de cacao. Recuperado el 12 de agosto de 2018 de https://www.cacaomexico.org/?page_id=201
- CAF. (2015). Para qué sirve la bioenergía. Recuperado el 17 de noviembre de 2018 de <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2015/11/para-que-sirve-la-bioenergia/?parent=14092>
- Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., y Forster, C. F. (1999). Co-

digestion of waste organic solids, batch studies, 0, 117–122.

- Carlin, R. (2015). Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Recuperado el 5 de noviembre de 2018 de <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/4497>
- Castillo, M., Ramírez, M., García, R., Berna, M., Espinosa, B., Solís, J. A., y Durán, C. (2010). Reaprovechamiento Integral De Residuos Agroindustriales: Cáscara Y Pulpa De Cacao Para La Producción De Pectinas. *Revista Latinoamericana El Ambiente Y Las Ciencias*, 1(2), 45–66. Recuperado el 3 de agosto de 2018 de http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/rlac/resources/LocalContent/24/1/REAPROVECHAMIENTO INTEGRAL Franco-Castillo.pdf
- Cendales, L. (2011). Produccion de biogas mediante la co digestion anaerobica de mezclas de residuos citricos y estiercol bovino para su utilizacion como fuente de energia renovable. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 26 de agosto de 2018 de <http://bdigital.unal.edu.co/4100/>
- Cho, S. K., Im, W. T., Kim, D. H., Kim, M. H., Shin, H. S., y Oh, S. E. (2013). *Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and methanogenic community analysis. Bioresource Technology*, 131(2013), 210–217. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.100>
- Corona, I. (2007). Biodigestores. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado el 13 de agosto de 2018 de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/362>
- Corporación Fortaleza del Valle. (2018). Ecuador tiene dos tipos de cacao. Recuperado el 21 de agosto de 2018 de <http://fortalezadelvalle.org/ecuador-tiene-dos-tipos-de-cacao/>
- Cotrina, R. (2011). La importancia de los biodigestores en el desarrollo rural. Cusco: Soluciones Prácticas. Recuperado el 14 de septiembre de

- 2018 de
http://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergia/cusco_cedepac/importancia-biodigestores-robert_cotrina.pdf
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., ... Masera, O. (2015). *Bioenergy and climate change mitigation: An assessment*. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916–944.
<http://doi.org/10.1111/gcbb.12205>
- De La Torre, N. (2008). *Digestión Anaerobia en Comunidades Rurales*. Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado el 5 de mayo de 2018 de
https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11627/PFC_Nadia_deLaTorre_Caritas.pdf;jsessionid=8383DC148AB7E611A4744464A99E3E73?sequence=1
- Drosg, B., Braun, R., Bochmann, G., y Al Saedi, T. (2013). *Analysis and characterisation of biogas feedstocks*. *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*.
<http://doi.org/10.1533/9780857097415.1.52>
- Edenhofer, O., Pichs Madruga, R., y Sokona, Y. (2012). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. *Clim. Policy* (Vol. 6).
<http://doi.org/10.5860/CHOICE.49-6309>
- Ellesmere. (2015). *Measuring a Rate of Reaction*. Recuperado de
<https://sites.google.com/site/ellesmerealevelchemistry/module-3-periodic-table-energy/3-2-physical-chemistry-1/3-2-2-reaction-rates/3-2-2-e-measuring-a-rate-of-reaction>
- El Telégrafo. (2017). *Planta de biogás producirá energía para 7.300 familias ecuatorianas*. Recuperado el 3 de abril de 2018 de
<https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/planta-de-biogas-producira-energia-para-7-300-familias-ecuatorianas>
- Enríquez, A., y Jurado, M. (2016). *Análisis del arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio Taiwán en condiciones psicrófilas en el SENA (Nariño-Colombia)*. *Unimar*, 34(1), 243–259.

- ESIN Consultora. (2014). Atlas Bioenergético del Ecuador. *Atlas Bioenergético Del Ecuador, Primera Ed*, 1–150.
- European Biogas Association. (2012). *EBA presents the latest biogas production statistics for Europe – growth continues!*. Recuperado el 3 de abril de 2018 de <http://european-biogas.eu/2013/12/20/eba-presents-latest-biogas-production-statistics-europe-growth-continuous/>
- Evans, G. (2015). *IGCC: the future of coal power?*. Recuperado el 8 de mayo de 2018 de <https://www.power-technology.com/features/featureigcc-the-future-of-coal-power-4583854/>
- Fajardo, F. (s.f.). ¿Quién fue el creador del cacao ccn-51? Homero Castro Zurita, conózcalo. Recuperado el 19 de agosto de 2018 de http://www.elcacaotero.com.ec/cacao_ccn51.html
- FAO. (s.f.-a). Adaptación y mitigación al cambio climático. Recuperado el 17 de abril de 2018 de <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/climate-change-adaptation-and-mitigation/basic-knowledge/es/>
- FAO. (s.f.-b). Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación. Recuperado el 17 de abril de 2018 de <http://www.fao.org/gleam/results/es/>
- Ferrer, I., Uggetti, E., Poggio, D., y Velo, E. (2008). Producción de Biogás a partir de residuos orgánicos en Biodigestores de bajo coste. *Researchgate.Net*, 7. Recuperado el 19 de agosto de 2018 de http://www.researchgate.net/publication/228710469_PRODUCION_DE_BIOGAS_A_PARTIR_DE_RESIDUOS_ORGANICOS_EN_BIODIGESTORES_DE_BAJO_COSTE/file/79e4150f5d8fc08d8c.pdf
- Flores, A. (2014). Informe de Determinación de Humedad en Cebada. Universidad Nacional de Moquegua. Moquegua: Universidad Nacional de Moquegua.
- FMAM, SGP, PNUD, y UNOPS. (2009). Disminución de las emisiones de metano a la atmósfera mediante el uso de biodigestores tubulares de polietileno en el manejo del estiércol del ganado. Villa Clara: Programa de Pequeñas Donaciones. Recuperado el 19 de agosto de

2018 de http://www.undp.org/content/dam/cuba/docs/Medio Ambiente y Energía/Programa de Pequeñas Donaciones/OP_4/44. PROYECTO BIODIGESTORES VILLA CLARA.pdf

Fundación Hábitat. (2005). Biodigestores una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes. Quimbaya: Fundación Hábitat.

Gallardo, A., y Riofrío, J. (2010). Factibilidad Técnica y Económica para el desarrollo de una instalación termoeléctrica de 160 kW mediante la combustión de biogás para la Hacienda “Tarragona.” Recuperado el 17 de agosto de 2018 de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4067/1/T-ESPEL-0762.pdf>

Gobierno Autónomo Descentralizado de la Parroquia Pueblo Nuevo. (2015). Diagnóstico Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Pueblo Nuevo. Recuperado el 14 de julio de 2018 de http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1360025460001_PDOT Parroquia Pueblo Nuevo, Catón Portoviejo, Provincia de Manabí 2015 - 2019_26-10-2015_12-34-30.pdf

González, Á. (2012). Modelo de empresa asociativa acopiadora de Cacao Fino de Aroma para los productores del cantón Quinsaloma. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado el 5 de julio de 2018 de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2748>

González, G. I., Rustrián, E., y Houbron, E. (2008). Impacto de la tasa de humedad en la biodegradación de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Veracruz, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(3), 336–341.

Guerrero, L. (2016). Biodigestor continuo. Recuperado el 10 de agosto de 2018 de <https://www.aboutespanol.com/tipos-de-biodigestores-y-sus-disenos-3417696>

Guitérrez, E., y Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188.

<http://doi.org/10.7550/rmb.37737>

- Hamelinck, C. N., y Faaij, A. P. C. (2006). *Outlook for advanced biofuels. Energy Policy, 34*(17), 3268–3283. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.012>
- Heres, D. (2015). El cambio climático y la energía en América Latina. *CEPAL, Naciones Unidas*.
- Hristov, A., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., ... Oosting, S. (2013). Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. *Fao*.
- INEC, y AME. (2014). Estadísticas de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, 30. Recuperado el 25 de agosto de 2018 de http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_ConsProvinciales_2014/Municipios-2014/201412_GADS MunicipalesDocumentoTecnicoDeResultados.pdf
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007 Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team IPCC]*. <http://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- IPCC. (2013). Cambio climático 2013: Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, 1–30.
- IPCC. (2014). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis / Resumen para responsables de políticas. *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis*, 2–38. [http://doi.org/10.1016/S1353-8020\(09\)70300-1](http://doi.org/10.1016/S1353-8020(09)70300-1)
- Ismail, O. S., y Adewole, O. S. (2014). *Evaluating the biogas yield and design of a biodigester to generate cooking gas from human faeces. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 13*(25), 232–241.
- ITDG. (s.f.). Ficha Técnica Biodigestores, (511), 444–447.
- Junginger, M., Goh, C., y Faaij, A. (2014). *International Bioenergy Trade: History, Status y Outlook on Securing Sustainable Bioenergy Supply, Demand and Markets. Springer*. Dordrecht, Netherlands.
- Kemper, J. (2015). *Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review. International Journal of Greenhouse Gas Control, 40*, 401–430.

<http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.012>

- Kerr, R. A. (2005). *Confronting the Bogeyman of the climate system*. *Science*, 310(5747), 432–433. <http://doi.org/10.1126/science.310.5747.432>
- Kothari, R., Pandey, A. K., Kumar, S., Tyagi, V. V., y Tyagi, S. K. (2014). *Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 174–195. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>
- Kumar, K., Ghosh, S., Angelidaki, I., Holdt, S. L., Karakashev, D. B., Morales, M. A., y Das, D. (2016). *Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 235–249. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.055>
- Lam, J., Heedge, F., y Eije, S. von. (2014). *Reader for the Compact course on Domestic Biogas Technology and mass dissemination*. Smart Development Works. Recuperado el 19 de septiembre de 2018 de <https://pdfs.semanticscholar.org/c0c9/b41526be134302826686183a34f5917c65b1.pdf>
- López, G. (2007). *Determinación de la cantidad, calidad y tiempo de generación de biogás a partir de residuos sólidos urbanos*. Bogotá: Universidad Distrital.
- Macias-Corral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H., y Longworth, J. (2008). *Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure*. *Bioresource Technology*, 99(17), 8288–8293. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.057>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., y Ren, G. (2015). *Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Martí, J., Andrade, E., Hidalgo, E., y Parra, G. (2015). *Introducción de biodigestores en sistemas agropecuarios en el Ecuador*. Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador. Recuperado el 19 de agosto de 2018 de <http://beegroup-cimne.com/kt->

- content/uploads/2017/02/2015_Manual_Biodigestores_Ecuador.pdf
- Martí, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Digestion*. Boca Raton: Dissertation.
- Martín, N. Y., de Jesús Rojas, G., Arenas, N. E., y Herrera-Franco, V. (2017). Alternativas nutricionales para disminuir emisiones de gas metano por bovinos y su efecto en el calentamiento global. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 3(1), 8–17.
- Medina, J., Sánchez, M., Hidalgo, A., Jiménez, E., Ruíz, T., Espinosa, M., y Delgado, R. (2018). Estudio sobre el potencial del uso de residuos lignocelulósicos. *MICA*, (1), 6–23.
- MINENERGIA, PNUD, FAO, GEF. (2011). Manual de Biogás. Recuperado el 19 de agosto de 2018 de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2015). Aprovechamiento energético de residuos un aporte a la lucha contra el cambio climático. Recuperado el 20 de agosto de 2018 de <http://www.ambiente.gob.ec/aprovechamiento-energetico-de-residuos-un-aporte-a-la-lucha-contra-el-cambio-climatico/>
- Ministerio del Ambiente. (2017). Manual Básico de Aprovechamiento Energético de Residuos Agropecuarios. Recuperado el 10 de octubre de 2018 de http://beegroup-cimne.com/kt-content/uploads/2017/02/2015_Manual_Biodigestores_Ecuador.pdf.
- Ministerio del Ambiente. (2017). Tercera Comunicación Nacional del Ecuador. Quito: Ministerio del Ambiente.
- Moncayo, G. (2008). Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás. (Aqualimpia Beratende Ingenieure, Ed.).
- Montes, M. (2008). Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás, 287.
- Morales, P. (2018). Evaluación experimental del potencial de producción de biogás a partir de aguas residuales procedentes del Camal Metropolitano de Quito. Recuperado el 18 de septiembre de 2018 de

- <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19526/1/CD-8919.pdf>
- Motte, J., Trably, E., Escudié, R., Hamelin, J., Steyer, J., Bernet, N., ... Dumas, C. (2013). *Total solids content: a key parameter of metabolic pathways in dry anaerobic digestion*, 1–9.
- Mukumba, P., Makaka, G., y Mamphweli, S. (2016). *Batch anaerobic co-digestion of cow dung and donkey manure*. *South Africa Journal of Science*, 112(Thours), 4.
- Murillo, I. (2008). Evaluación de 2 Dietas Experimentales con Diferentes Niveles de Cascarilla de Cacao (*Theobroma cacao* L.) en las Fases de Crecimiento y Acabado de Cuyes (*Cavia porcellus* L.) de Raza Andina, 108. Recuperado el 8 de septiembre de 2018 de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19134>
- Naciones Unidas. (s.f.). Cambio climático. Recuperado el 8 de mayo de 2018 de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- OCEANA. (s.f.). Cambio Climático. Recuperado el 8 de mayo de 2018 de <https://eu.oceana.org/es/cambio-climatico>
- Ortiz, K., y Álvarez, R. (2015). Efecto del vertimiento del subproducto del beneficio de cacao (*Theobroma cacao* L.) sobre algunas propiedades químicas y biológicas en los suelos de una finca cacaotera, Municipio de Yaguará (Huila, Colombia). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 19(1), 65–84. <http://doi.org/10.17151/bccm.2015.19.1.5>
- Padrón, G., Arias, E., Romero, J., Benavides, A., Zamora, J., y García, S. (2004). Efecto de la cáscara de cacao en la obtención de espumas de poliuretano para uso hortícola. Propiedades físicas y de biodegradabilidad. *Rev. Soc. Quím. Méx*, 48, 156–164.
- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cárdenas, L., Vásquez, C., Torres, W., y Ordóñez, J. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista U.D.C.A*, 17, 553–562.
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., ... Williams, S. E. (2017). *Biodiversity redistribution under climate*

- change: Impacts on ecosystems and human well-being. Science, 355(6332).* <http://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Pei, P., Zhang, C., Li, J., Chang, S., Li, S., Wang, J., ... Chen, X. (2014). *Optimization of NaOH Pretreatment for Enhancement of Biogas Production of Banana Pseudo-Stem Fiber using Response Surface Methodology. BioResources, 9(3), 5073–5087.*
- Pour, N., Webley, P. A., y Cook, P. J. (2018). *Potential for using municipal solid waste as a resource for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). International Journal of Greenhouse Gas Control, 68(November 2017), 1–15.* <http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.11.007>
- Prefectura de Esmeraldas. (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Esmeraldas 2015-2025, 170. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- RedBioLAC. (2017). 9° Encuentro RedBioLAC. Recuperado el 17 de agosto de 2018 de <http://redbiolac.org/presentacion/>
- Redgwell, R., Trovato, V., Merinat, S., Curti, D., Hediger, S., y Manez, A. (2002). *Dietary fibre in cocoa shell: characterisation of component polysaccharides. Focus-(NY). 1993. 43(3), Pp 1-6., 81, 103–112.* [http://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00385-0](http://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00385-0)
- REN21. (2013). *Renewables 2013. Global Status Report. International Geothermal Association.*
- Rivas, O., Faith, M., y Guillén, R. (2011). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Revista Tecnología En Marcha, 23(1), 39.* Recuperado el 22 de agosto de 2018 de http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/132
- Robles, F. (2005). Formación de biogás y lixiviados. En generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Romero, D. (2017). La basura orgánica se aprovecha en el relleno sanitario de El Inga. Recuperado el 7 de mayo de 2018 de <http://www.elcomercio.com/actualidad/basura-rellenosanitario-elinga-energia-quito.html>

- Sahito, A. R., Mahar, R. B. U. X., y Ahmed, F. (2014). *Effect of Buffalo Dung to the Water Ratio on Production of Methane through Anaerobic Digestion*, 33(2), 237–244.
- Salazar, T., y Quirós, A. (2017). Estimación del potencial metanogénico de la codornaza considerando las variables de dilución , adición de nutrientes y codigestión, (February). <http://doi.org/10.18845/tm.v29i4.3041>
- Sánchez, J. (2013). Evaluación energética de cáscaras de Cacao Nacional y CCN-51. *El Escorial*, 34,56.
- Secretaría de Ambiente. (2011). Inventario de Emisiones de Gases del Efecto de Invernadero en el Distrito Metropolitano de Quito .
- Siegert, I., y Banks, C. (2005). *The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. Process Biochemistry*, 40(11), 3412–3418. <http://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.01.025>
- Subash, U., Dong, D., Kimball, B., Garg, A., y Upadhyay, J. (2012). *Tecnologías para la mitigación del cambio climático – Sector Agropecuario–*.
- Tay, M. (2017). *Rendimiento de biogás y biofertilizante en la digestión anaerobia de estiércol de animales y rastrojos en Lambayeque*. Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo.”
- USEPA. (2001). *METHOD 1684 Total , Fixed , and Volatile Solids in Water , Solids , and Biosolids Draft January 2001 U . S . Environmental Protection Agency Office of Water Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division (4303)*, (January), 1–13.
- USEPA. (2004). Method 9045D: Solid and waste pH. *Biophysical Journal*, 87(5), 3088–3099.
- Vögeli, Y., Riu, C., Gallardo, A., Diener, S., y Zurbrügg, C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries. EAWAG - Sandec: Department of Water and Sanitation in Developing Countries*. <http://doi.org/10.13140/2.1.2663.1045>
- Wang, K., Yin, J., Shen, D., y Li, N. (2014). *Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum:*

- Effect of pH. Bioresource Technology*, 161, 395–401.
<http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.088>
- Yilmaz, A. H., y Atalay, F. S. (2003). *Modeling of the anaerobic decomposition of solid wastes. Energy Sources*, 25(11), 1063–1072.
<http://doi.org/10.1080/00908310390233586>
- Zambrano, M. (2016). Rendimiento de biogás a partir de mezclas entre estiércol de vacuno y suero de quesería mediante digestión anaeróbica. Universidad Nacional Agraria. Recuperado el 21 de septiembre de 2018 de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2711>
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., y Li, Y. (2014). *Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Progress in Energy and Combustion Science*, 42(1), 35–53.
<http://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>

ANEXOS

Anexo 3. Temperatura (K) y Presión (atm) medida diariamente

Día	Temperatura corregida (K)	Presión corregida (atm)
4	293.15	1.00764866
5	293.15	1.00764866
6	294.15	1.00764866
7	294.15	1.00764866
8	294.15	1.00764866
10	290.15	1.00764866
11	289.15	1.01258327
12	285.15	1.01258327
13	290.15	1.01357019
14	286.15	1.01455712
15	293.15	1.01357019
17	290.15	1.01357019
18	289.15	1.01357019
19	289.15	1.01357019
20	290.15	1.01357019
21	288.15	1.01455712
22	289.15	1.01357019
24	290.15	1.01258327
25	287.15	1.01258327
26	292.15	1.01159635
27	290.15	1.01159635
28	289.15	1.01159635
29	296.15	1.01159635
31	299.15	1.00764866
32	297.15	1.00666173
33	296.15	1.00764866
34	293.15	1.00764866
35	298.15	1.00567481
36	295.15	0.99847027
38	296.15	0.99827288
39	300.15	1.00863558
40	293.15	1.00666173
41	297.15	1.00666173
42	289.15	1.00764866
46	294.15	1.01455712
47	291.15	1.01258327

Anexo 4. Abreviaturas

CH₄: Metano

CN: Condiciones Normales de presión y temperatura

CO₂: Dióxido de carbono

BECCS: Siglas en inglés de Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GENCAPER: Generación de Capacidades para el Aprovechamiento Energético de Residuos Agropecuarios

IGCC: Siglas en inglés de ciclo combinado de gasificación integrada

IPCC: Abreviaturas en inglés de Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

LAJSA: Siglas en inglés de Asociación de Estudios Judíos de Latinoamérica

MAE: Ministerio del Ambiente del Ecuador

N₂O: Óxido nitroso

NaOH: Hidróxido de Sodio

O₃: Ozono

SV: Sólidos Volátiles

ST: Sólidos Totales

