

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE METANO CON
DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS ORGÁNICOS
RURALES**

DERLY TATIANA GUANEME ANGARITA

**Proyecto integral de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA

Ingeniero químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing.

Ing.

Bogotá D.C. Febrero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

DEDICATORIA

A mis seres queridos por su incondicional apoyo, ánimo y la paciencia que me ofrecieron para alcanzar este gran logro, distinguiendo en ellos su amor, sacrificio y tolerancia para comprender las exigencias propias de este estudio académico

Derly Tatiana Guaneme Angarita

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la sabiduría y guiarme en este camino del triunfo profesional, segundo a mi familia la cual ha sido un apoyo incondicional en cada paso llevado a cabo, como además la organización, docentes, tutor y cada una de esas personas que han estado relacionadas en el presente trabajo, por el compromiso constante en el aprendizaje obtenido a lo largo de mi trayectoria, pudiendo de este modo alcanzar un objetivo importante a nivel educativo.

Derly Tatiana Guaneme Angarita

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por Los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	14
1. METODOLOGÍA	15
2. MARCO DE REFERENCIA	16
2.1 Marco conceptual	16
2.1.2 BMP (Potencial bioquímico de metano).	16
2.1.3 Codigestión.	16
2.1.4 Materia orgánica.	16
2.1.5 Residuos orgánicos.	16
2.2 Marco teórico	17
2.2.1 Digestión anaerobia	17
2.2.2 Fases de la digestión anaerobia	18
2.2.3 Reacciones de la digestión anaerobia	18
3. ANÁLISIS DE PROBLEMÁTICAS	21
3.1 Problemática actual en cuanto al manejo de los residuos orgánicos rurales	22
3.1.1 Impactos Ambientales de la Problemática de los Residuos Sólidos	23
3.1.2 Impactos sobre cuerpos hídricos superficiales	23
3.1.3 Impacto sobre las aguas subterráneas	24
3.1.4 Impacto sobre el suelo	24
3.1.5 Impacto sobre el aire	25
3.1.6 Antecedentes en Colombia	25
4. IDENTIFICAR LAS CONDICIONES Y LOS PARÁMETROS MÁS RELEVANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO	29
4.1. Materiales y métodos	29
4.2 Perspectivas de la DA de la lista de materiales (BOM)	29
4.3 Fermentación anaeróbica	30
4.4 Respiración anaeróbica	30
4.5 Etapa producción metano	30

4.6 Factores determinantes en el proceso de producción de biogás	31
4.7 Composición de la materia orgánica	31
4.8 Temperatura	32
4.9 pH	33
4.10 Nutrientes	33
5. COMPARACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE METANO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS ORGÁNICOS	35
5.1 Residuos orgánicos biodegradables	35
5.2 Residuos ganaderos	35
5.3 Identificación del potencial de metano por residuo	37
5.4 Comparación del contenido orgánico, sólidos volátiles y producción de metano	38
5.5 Experiencias en la digestión anaerobia de biorresiduos	39
6. CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFÍA	

LISTAS DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Fases de la digestión anaerobia	18
Figura 2. Producción de residuos sólidos en hogares de los municipios de Cundinamarca	26
Figura 3. Distribución de sistemas de disposición final	28
Figura 4. Tasa de crecimiento de los microorganismos anaeróbicos en los diferentes rangos de temperatura de operación	33

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Reacciones bioquímicas en la DA de la materia orgánica	20
Tabla 2. Composición de los RSM de las ciudades más importantes de Colombia	25
Tabla 3. Razón de Carbono a Nitrógeno	34
Tabla 4. Referencias de producción de metano para deyecciones ganaderas	36
Tabla 5. Características de diferentes tipos de residuos	37
Tabla 6. Comparación del contenido orgánico, sólidos volátiles y producción de metano	38
Tabla 7. Experiencias en la digestión anaerobia de biorresiduos	40

LISTA DE SIGLAS

PBM: Potencial Bioquímico de Metano
MO: Materia orgánica
DA: Digestión anaerobia
RSM: Residuos sólidos municipales
BOM: Biorresiduos de origen municipal.
GEI: Gas efecto invernadero
PGIRS: Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos
OXITOP: Sistema para medir las aguas residuales.
F42O: Coenzima en los organismos metanógenos.
AGV: Ácidos grasos volátiles
RS: Residuos sólidos
BBO: Terra filtrantes de aceites, con bentonita.
BPA: Buenas Prácticas Ambientales
FORM: Fracción orgánica de residuos municipales

RESUMEN

Generalmente, la principal fuente de obtención de energía en las zonas rurales corresponde a recursos no renovables como el carbón, el petróleo y el gas natural, no obstante, debido a que la demanda está en aumento y los recursos para obtenerlos disminuyen aceleradamente, la problemática vigente sobre energía es cada vez más evidente lo que hace primordial averiguar sobre otras fuentes potenciales de generación de energía. Es por esto que, teniendo en cuenta la gran cantidad de desechos sólidos y líquidos orgánicos que se generan en estas zonas pueden ser potenciales fuentes de producción de biogás. El biogás, como fuente de energía renovable, ha generado gran interés en los últimos años, siendo tal vez una de las tecnologías de más fácil desarrollo, en especial en sectores rurales. Su potencial desarrollo, no solo tomando en cuenta la producción de biogás, sino también como ayuda a la obtención de biofertilizantes puede ser la solución para evitar el uso de recursos naturales como la madera, el carbón o el petróleo. Esto ayudaría a minimizar las emisiones de CO₂ provenientes de los usuarios finales y las plantas generadoras de energía, y además las emisiones de otros contaminantes del aire como el dióxido de azufre, material particulado (principal fuente de inconvenientes para la salud) y trazas de otros contaminantes peligrosos en el aire. Por otro lado, la actividad agropecuaria y el correcto funcionamiento de residuos rurales tienen la posibilidad de contribuir de manera significativa a la producción y conversión de residuos animales y vegetales (biomasa) en diversas formas de energía.

Palabras Claves: Energía, Zonas Rurales, Residuos, Biogás, Emisiones, Potenciales, Recursos.

INTRODUCCIÓN

En el presente documento se da a conocer la temática relacionada con la evaluación del potencial de producción de metano a partir de diferentes tipos de residuos sólidos y líquidos orgánicos rurales. Para la actual investigación se planteó como objetivo principal: determinar el potencial de producción de metano entre residuos sólidos y líquidos orgánicos rurales. Con este fin, se realizó una búsqueda bibliográfica; se identificaron las condiciones y los parámetros más relevantes en la producción de biogás; y, por último, se comparó el potencial de producción de metano entre las distintas fuentes.

Es importante destacar que dentro de la investigación se identificaron diferentes conceptos, teorías, referentes históricos y legales necesarios para la ejecución de dicho proyecto. Por otro lado, dentro del documento se desarrolló cada objetivo de manera consistente, teniendo en cuenta la perspectiva de los residuos orgánicos rurales y la problemática actual en cuanto al manejo de residuos orgánicos rurales. Finalmente, se dan a conocer las conclusiones, recomendaciones y referentes bibliográficos importantes para la ejecución de la investigación. Por tanto, esta investigación se desarrolló con el fin de dar a conocer un estudio intensivo a partir de aportes de autores, que ayudaron a analizar la percepción del metano. Por consiguiente, se espera que esta investigación ayude al área de Ingeniería Química en futuros estudios concernientes al objeto de estudio planteado.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el potencial de producción de metano entre residuos sólidos y líquidos orgánicos rurales.

Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre la problemática actual en cuanto al manejo de los residuos orgánicos rurales.
- Identificar las condiciones y los parámetros más relevantes para la producción de metano.
- Comparar el potencial de producción de metano de los diferentes tipos de residuos sólidos y líquidos orgánicos.

1. METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se presenta la información concerniente al objeto de estudio, proporcionando los diferentes conceptos, teorías, referentes históricos y legales, necesarios para la ejecución de este proyecto.

La metodología que se aplicó para realizar la investigación de tipo informativa fue la siguiente:

- **Selección del material:** Primero que todo se llevó a cabo una recolección de información por medio de diferentes bases de datos (Science Direct, Scopus, Google académico) de diferentes artículos. Se planteó una ecuación de búsqueda con palabras clave como “digestión anaerobia”, “biogás”, “residuos orgánicos”, “potencial de producción de metano”, entre otros.
- **Revisión del material:** Una vez realizada la búsqueda por medio de palabras clave se obtuvo un total de 5.473 resultados. Debido a la infinidad de información recolectada se decidió hacer uso de operadores booleanos (*and, or, not*) para depurar información y reducir el número de resultados, obteniendo así un número de búsqueda de 2.127.
- **Organización:** Se seleccionó un total de 20 autores, en los cuales se encontró información pertinente acerca de los impactos de los residuos desde diferentes perspectivas, también se encontró información sobre los parámetros y condiciones necesarias para llevar a cabo el proceso de DA y finalmente se encontró experiencias en la DA con diferentes tipos de sustratos.
- **Análisis de datos:** Se analizó la información recolectada y se llevó a cabo la construcción del documento.
- **Conclusiones:** Se establecieron las diferentes conclusiones por cada uno de los objetivos planteados en el documento.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Marco conceptual

2.1.1 *Biogás*

El biogás se puede definir como el resultado de la descomposición en la ausencia de oxígeno (un proceso llamado digestión anaerobia) de varias sustancias orgánicas, por una gran cantidad de bacterias, es una de las fuentes alternativas más utilizadas para la producción de energía renovable. Está conformado principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% en volumen es inflamable [1].

2.1.2 *BMP (Potencial bioquímico de metano)*

Es un test que se realiza para evaluar si los desechos se pueden descomponer adecuadamente para producir metano. El rendimiento de metano (es decir, el porcentaje de sólidos que se añaden o destruyen durante la digestión anaeróbica) puede indicar la biodegradabilidad de un sustrato. [1]

2.1.3 *Codigestión*

La codigestión es la digestión anaerobia de dos o más sustratos de origen diferente. Su principal ventaja consiste en aprovechar la sinergia de la mezcla debido a los mejores rendimientos en la degradación de la materia orgánica [1].

2.1.4 *Materia orgánica*

Hace referencia a un elemento que se compone en gran medida de muchos compuestos de carbono y su producción en gran parte se debe a la fotosíntesis que generan las plantas [1].

2.1.5 *Residuos orgánicos*

Son todos aquellos materiales que provienen de especies de flora o fauna y son susceptible a descomposición por microorganismos, también pueden provenir de restos, sobras o productos de desecho de cualquier organismo [2] Algunos ejemplos pueden ser: cáscaras de frutas y verduras,

sobras de comida, huesos y restos de carne, servilletas o manteles de papel con restos de materia orgánica, restos de café, huesos de animales, entre otros [3].

2.2 Marco teórico

En los diferentes procesos de obtención de energía desde la biomasa se encuentra la digestión anaerobia de tipo bioquímico, en la que la materia orgánica (Estiércol, residuos agrícolas, lodos de aguas residuales, sólidos o líquidos, residuos de la industria alimentaria) es degradada en ausencia de oxígeno para la producción de biogás por medio de sociedades de microorganismos.

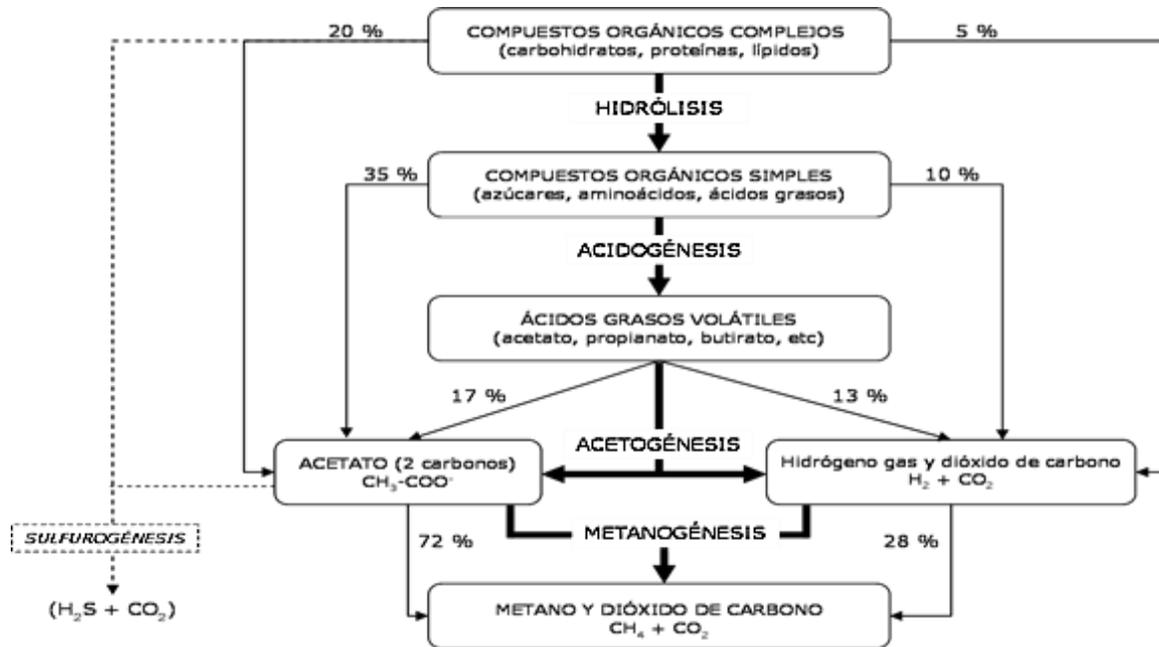
2.2.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el cual la materia orgánica se encuentra en ausencia de oxígeno, y por medio de la acción de un conjunto de bacterias específicas, esta se lleva a un proceso en el cual se descompone en productos gaseosos o “biogás” y en digestato el cual corresponde a una mezcla de productos minerales como: Nitrógeno, Fosforo, Potasio, Calcio entre otros y compuestos de difícil degradación [4] La materia prima que se puede utilizar puede ser cualquier biomasa residual que contenga un porcentaje alto en humedad algunos ejemplos pueden ser residuos agrícolas, ganaderos o residuos de las industrias de transformación de dichos productos.

Algunos de los residuos que se pueden encontrar son purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. El tratamiento de estos residuos puede hacerse de manera individual a lo cual se le conoce como DA o mediante la codigestión la cual consiste en el tratamiento conjunto de 2 o más residuos. La DA también puede ser utilizada también como método para evaluar aguas residuales que posean alto contenido de materia orgánica, como las generadas en muchas industrias alimentarias [4]. La cantidad de biogás que puede llegarse a producir es muy variable, pero generalmente se puede encontrar que este oscila alrededor de los 350 L/kg de sólidos degradables, con un contenido en metano del 70 %. Aunque su potencia calorífica no es bastante grande, se puede decir que este puede reemplazar con facilidad al gas natural y puede ser utilizado en aplicaciones tan distintas como calefacción y combustible, sin embargo, la masa restante biodegradada por las bacterias puede utilizarse como abono para la fertilización de suelos. [5] La digestión anaerobia tiene se conforma de 4 etapas las cuales se pueden observar en la figura 1.

2.2.2 Fases de la digestión anaerobia

Figura 1. Fases de la digestión anaerobia



Nota: La figura representa las fases de la digestión anaerobia. Tomado de: G. Silvestre, «¿Por qué la fermentación oscura puede ser una alternativa sostenible para valorizar residuos?», 2015. [En línea]. Available: <https://www.ainia.es/insights/por-que-la-fermentacion-oscura-puede-ser-una-alternativa-sostenible-para-valorizar-residuos/>.

La digestión anaerobia es un proceso que está compuesto de 4 etapas diferenciadas: 1) Desintegración e hidrólisis, 2) Acidogénesis, 3) Acetogénesis y 4) Metanogénesis en estas etapas la materia orgánica sufre un proceso de transformación en donde se pueden encontrar distintos compuestos intermedios para finalmente convertirse en biogás el cual corresponde a una mezcla principalmente entre metano y dióxido de carbono (Figura 1). El proceso tiene unas interacciones microbiológicas complejas, en la que se puede observar la interacción de diversas poblaciones microbianas con una relación simbiótica entre sí [5]. El proceso de digestión anaerobia tradicional se puede llevar a cabo en “digestores” donde en un mismo espacio físico se lleva a cabo todo el proceso biológico descrito anteriormente, incluyendo las cuatro etapas, con tiempos de retención hidráulicos variables los cuales dependen de la tipología de sustrato que se alimenta a los digestores, la temperatura, velocidad de carga orgánica, entre otros [6].

Se puede encontrar también la digestión anaerobia en dos fases, ésta consiste en dividir de forma física, las etapas microbiológicas en dos biodigestores: en el primero se realizarían las dos primeras fases, la hidrólisis y la acidogénesis de la materia orgánica, es por esto que el primer digestor toma el nombre de “digestor hidrolítico” y para el segundo el digestor se alimenta con el efluente del primer digestor para llevar a cabo las otras dos fases, la acetogénesis y la metanogénesis [6]

La producción del biohidrógeno desde los residuos orgánicos puede ser optimizada teniendo en cuenta las condiciones de operación específicas que se apliquen en el digestor hidrolítico entre ellas se puede encontrar pH, tiempos de retención hidráulico, temperatura, etcétera. A esto se le conoce como fermentación oscura [6].

La corriente final que se obtiene en la primera fase se encuentra en estado líquido y es alta en contenido de ácidos grasos. Esta corriente final puede ser alimentada a un segundo digestor para ejecutar la fase de acidogénesis y metanogénesis y finalmente generar una corriente gaseosa compuesta primordialmente por metano y CO₂ [7].

- **Hidrólisis:** en esta etapa se solubilizan los compuestos orgánicos más complejos como: proteínas, carbohidratos y lípidos esto a través de enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular convirtiendo dichos compuestos en moléculas más simples como: aminoácidos, glucosa y ácidos grasos [8].

Para esta etapa se encuentra una temperatura óptima entre 30 – 50 °C y con un pH óptimo de 5 – 7, aunque no hay evidencia de una mejor actividad hidrolítica por debajo de un pH de 7 [9].

- **Acidogénesis:** en la etapa hidrolítica se generan compuestos orgánicos solubles los cuales se fermentan y se transforman en ácidos orgánicos como acético, propiónico y butírico, principalmente. En esta etapa también se lleva a cabo la eliminación de cualquier traza de oxígeno que pudo quedar resultante en el proceso de digestión [9].

- **Acetogénesis:** en esta etapa los compuestos que se obtienen de la etapa anterior (acidogénesis) son transformados por bacterias acetogénicas las cuales dan como resultado productos como ácido

acético, hidrogeno y dióxido de carbono. Esta etapa también es conocida como acidogénesis intermediaria [9].

- **Metanogénesis:** esta es la etapa final en la que se produce el compuesto de interés CH₄ a partir del ácido acético o de mezclas de hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono CO₂ también puede formarse a través de otros sustratos como ácido fórmico y metanol [9].

2.2.3 Reacciones de la digestión anaerobia

Tabla 1

Reacciones bioquímicas en la DA de la materia orgánica

TIPO DE REACCIÓN	ECUACIÓN
Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$
Fermentación de glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Fermentación del butirato a acetato e H ₂	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Acetogénesis a partir de H ₂ y CO ₂	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del CO ₂ e H ₂	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Nota: La Tabla representa las principales reacciones bioquímicas que se efectúan en el proceso de la DA. Tomado de Aerbur, Digestión anaerobia, Colombia: Compt, 2013.

3. ANÁLISIS DE PROBLEMÁTICAS

La energía es un bien escaso, pero existe la posibilidad de aprovechar fuentes energéticas renovables para la producción de ésta. Desde esta perspectiva, la producción de metano responde a un modelo de producción energética a través de fuentes renovables utilizando residuos sólidos y líquidos, además de ser un método de reciclaje de los mismos. Colombia tiene cerca de 48 millones de habitantes de los cuales algo más de 11 millones viven en las zonas rurales de acuerdo con cifras del Censo 2018 realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (Dane) [10].

Por lo anterior, existe una responsabilidad personal y social de conservar el medio ambiente en condiciones adecuadas garantizando el desarrollo sostenible. Se ha generado en los últimos tiempos la búsqueda de nuevas fuentes de generación de energía, especialmente de energías renovables, además de algunas políticas por parte de diferentes entidades para promover el uso de este tipo de energía [10].

De otra parte, el crecimiento acelerado de la población y por lo tanto del consumo, implica que la generación de residuos por parte de esta sea cada vez mayor. Esto implica que se deben aplicar estrategias para manejar y aprovechar de manera adecuada el volumen de residuos que produce la población, y que generan en mayor medida un perjuicio sobre el medio ambiente [10].

Es importante que dichas estrategias además de prevenir los perjuicios sobre el medio ambiente, estén diseñadas pensando en la reutilización de los residuos sólidos y líquidos orgánicos generados en las zonas rurales, en el aprovechamiento de fuentes energéticas diferentes a las derivadas de combustibles fósiles y que sean utilizadas por esas mismas comunidades. Por lo tanto, el planteamiento de utilizar los residuos sólidos y líquidos como fuente energética renovable, implica aprovechar recursos que, de otro modo, se desperdiciarían [10].

Con el continuo crecimiento poblacional, países como Colombia enfrentan el reto de incrementar la producción de alimento para satisfacer la demanda, lo que trae como consecuencia

la acumulación de desechos sólidos y líquidos que pueden generar no solo la contaminación de ríos, lagos y lagunas sino también la degradación del suelo.

Adicionalmente, en las zonas rurales se emplean fuentes de generación de energía como la leña, lo que contribuye a la deforestación y otros problemas; por esta razón, surge la posibilidad de utilizar los residuos orgánicos sólidos o líquidos como fuentes generadoras de energía como el biogás que es más amigable con el medio ambiente [10].

3.1 Problemática actual en cuanto al manejo de los residuos orgánicos rurales

Los residuos sólidos conforman en la actualidad uno de los más serios inconvenientes medioambientales derivados de las ocupaciones productivas y de consumo. Diversos componentes han contribuido al agravamiento de este problema a lo largo de las últimas décadas:

- En la naturaleza todo se aprovecha; no obstante, el hombre ha roto con el lapso natural de circulación de la materia. Con la aparición de la agricultura y la ganadería, se inaugura una totalmente nueva etapa en la que el ser humano deja de depender de manera directa de los recursos naturales. Esto genera una más grande producción de desperdicios que cada vez son más difíciles de ser descompuestos y reutilizados. El ser humano actúa en la naturaleza como productor y consumidor, pero no como descomponedor. Este caso ha empeorado en los últimos cincuenta años con la migración masiva de las poblaciones del campo a la ciudad.
- El aumento poblacional, concentrado primordialmente en las gigantes zonas urbanas, ha causado un incremento indiscriminado de los residuos, bastante por arriba de las soluciones que se han puesto en práctica para su supresión o recuperación [11].
- La evolución de la comunidad de consumo ha dado sede a un cambio de acto en las pautas tradicionales del consumo. Se produce un aumento en la utilización de productos de un solo uso, al igual que un aumento en el sobre embalaje de los productos, lo que provoca un crecimiento en el volumen de los residuos a la par que un despilfarro de recursos no renovables [11].

- La falta de sistemas de tratamiento y supresión acordes con el volumen y tipo de los residuos producidos, y eficaces a partir de la perspectiva medioambiental [11].

Sin embargo, con la generación de desperdicios que son aproximadamente de 0,92 kg/hab/día, se cree que en la población urbana la cual corresponde a 360 millones de habitantes en Latinoamérica y el Caribe se está produciendo cerca de 330.000 toneladas cotidianas de residuos municipales, y unos 1.188 millones de toneladas anualmente. Los rellenos sanitarios y vertederos lixivian contaminantes en aguas subterráneas y además generan metano [11].

3.1.1 Impactos Ambientales de la Problemática de los Residuos Sólidos

La generación de residuos principalmente sólidos provoca impactos relevantes al medio ambiente y a la salud humana. Los impactos del medio ambiente y sociales causados por el uso y disposición final de los residuos son dependientes de las propiedades particulares del área geográfica que se analice [12].

Los principales problemas ambientales que se generan por un inadecuado uso y disposición de los residuos son: el deterioro estético de los centros urbanos y del paisaje natural, y los efectos adversos a la salud humana, en especial por la proliferación de vectores de enfermedades. Lo anterior se agrava considerando que, en la mayoría de municipios de la región, la descarga final de los residuos se hace en forma indiscriminada e incontrolada; en la mayoría de sitios de disposición final se arrojan residuos industriales, hospitalarios y domésticos sin ningún control, a esto se adiciona la existencia de personas que se dedican a labores de recuperación de materiales en dichos sitios [12].

3.1.2 Impactos sobre cuerpos hídricos superficiales

Uno de los más serios efectos del medio ambiente provocados por el funcionamiento inadecuado de los residuos, es la contaminación de las aguas superficiales generalmente por el vertimiento de éstos sobre los ríos, quebradas y otros cuerpos de agua. Dichos residuos pueden contener metales pesados que poseen una connotación bastante particular en el ambiente y en la

salud de los individuos y de otro lado, aumentan de manera considerable la carga orgánica, reduce el oxígeno disuelto presente en el agua e incrementan los nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) provocando un aumento fuera de control de algas y generando procesos de eutrofización. Este caso produce, no solo la pérdida del recurso agua, sino que involucra altas inversiones en hacerla eficaz para consumo humano [12].

3.1.3 Impacto sobre las aguas subterráneas

Los acuíferos, al igual que las aguas superficiales son contaminadas por la inadecuada disposición de los residuos; situación que se sabe, pero sin embargo es poco atendida en forma preventiva. En estudios posteriores al cierre de sitios, donde se depositaron basuras por varios años, como en el Cortijo y Gibraltar estudiados por la CAR en jurisdicción de Bogotá, se evidenciaron inconvenientes de contaminación de aguas subterráneas con plomo, cromo, mercurio y sustancias orgánicas [12].

3.1.4 Impacto sobre el suelo

La inadecuada disposición de los residuos (domésticos, industriales, hospitalarios y peligrosos) en sitios a cielo abierto, o enterrados sin control contaminan el recurso suelo. Actualmente, no existe una evaluación que posibilite conocer el total de área contaminada por los residuos y el efecto que se está presentando, debido a que éstos son diferentes dependiendo de la localización.

En varios municipios, en particular los de menor número de pobladores, existen botaderos de residuos a cielo abierto que, en algunas ocasiones, fueron dejados por presiones de la sociedad. Dichos sitios en su inicio fueron lotes abandonados por sus propietarios, o regiones húmedas que, por falta de interés de las autoridades a quienes compete el asunto, acabaron como botaderos de residuos tanto domésticos como industriales de forma indiscriminada y sin ningún control o prevención de efectos contaminantes sobre el suelo [12].

3.1.5 Impacto sobre el aire

En los botaderos a cielo abierto es notable la contaminación atmosférica, en especial por la generación de olores ofensivos, gases y partículas en suspensión, producto de las quemaduras o arrastre de los vientos. No obstante, no existe un diagnóstico que cuantifique la contaminación atmosférica por las quemaduras abiertas de residuos sólidos tanto en los botaderos, como por las quemaduras llevadas a cabo de forma directa por la sociedad. Es práctica habitual en varias zonas del territorio las quemaduras de residuos vegetales (flores, caña de azúcar, etcétera.) y de residuos hospitalarios. Adicionalmente, en las quemaduras no controladas, las cenizas son transportadas por el viento, la lluvia u otros agentes, propagándose de esta modalidad la contaminación a otros recursos naturales, a los bienes y a nuestra sociedad [12].

3.1.6 Antecedentes en Colombia

En Colombia se reporta un total de 134.752 toneladas de basura recogida por semana lo que equivale a 19.250 toneladas al día, esto tomado de 940 municipios donde se presta el servicio de recolección de basuras [12].

Tabla 2

Composición de los RSM de las ciudades más importantes de Colombia

Ciudad	BOM (%)	PyC (%)	P(%)	T(%)	V(%)	M(%)	H(%)	Ma(%)	Otros(%)	Fuente
Bogotá	56,9	22,5	0,8	3,7	4,3	1,8	-	-	11	(Parra, 2002)
Medellín	59,48	12,02	11,29	3,22	2,65	1,31	-	-	10,03	(UDEA, 2006)
Cali	65,54	6,23	10,14	1,98	2,56	1,06	7,73	0,62	4,14	(DAPM, 2009)
Barranquilla	51,37	12	8,67	-	-	-	-	-	27,96	(Bula et al, 2012)

PyC: Papel y cartón; P: Plásticos; T: Textiles; V: Vidrio; Me: Metal; H: Higiénicos; Ma: Madera

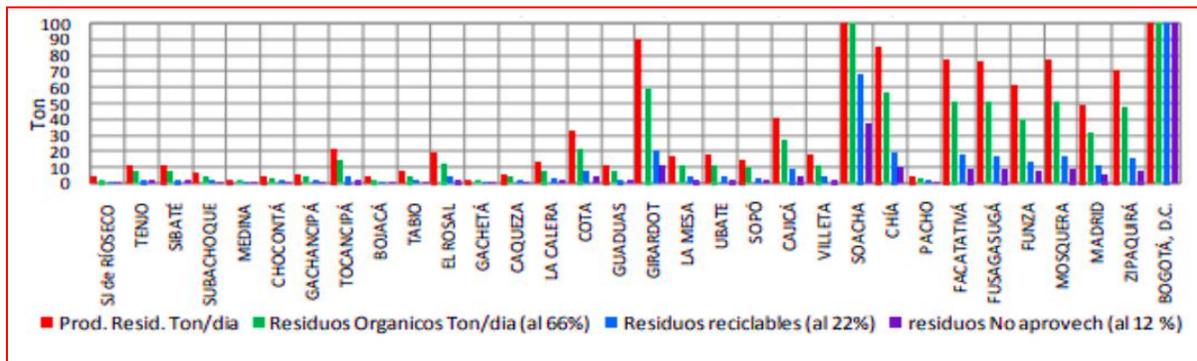
Nota: La Tabla representa la Composición de los residuos sólidos municipales (RSM) de las ciudades capitales más importantes de Colombia. Tomado de Univalle, «Producción de metano a partir de la digestión,» 2014.

Dentro de los residuos sólidos se encuentran los de origen municipal, los cuales constituyen gran parte de los residuos que se generan en el mundo además de ir en aumento por la dinámica

demográfica mundial. Los RSM incluyen los residuos domésticos, comerciales, institucionales, de mercados y de limpieza urbana, parques y jardines. En la tabla 2 se observa que la proporción de los biorresiduos de origen municipal (BOM), tienen una gran relevancia en cuanto a la definición de las estrategias u opciones de tratamiento o disposición de los residuos sólidos municipales (RSM) que se generan en cada región [13]. Por otro lado, según el informe Nacional de Disposición de Residuos Sólidos 2016, se encuentra que el 55% de las toneladas de residuos para disposición final, se centra en 3 departamentos (Antioquia, Valle del Cauca, Atlántico) y el Distrito Capital. De estos, a Bogotá D.C le corresponde el 19, 25%; con 2.175.203 ton/año de desechos respectivamente. Lo anterior, debido a que en estos lugares se ubica las zonas del país con mayor densidad demográfica, teniendo en cuenta las proyecciones del DANE presentadas para el año 2016 [14]

Figura 2

Producción de residuos sólidos en hogares de los municipios de Cundinamarca



Nota: La Figura representa la Producción de residuos sólidos en hogares de municipios. Tomado de R. L. Gutiérrez, «La generación de residuos orgánicos en Cundinamarca y sus mecanismos de aprovechamiento en la generación de energías limpias».

Según la figura 2 y el informe de Indicadores Ambientales Domésticos, los mayores productores de residuos orgánicos, residuos reciclables y residuos no aprovechables, son los municipios aledaños del Distrito Capital entre los que se encuentran: Soacha, Chía, Facatativá; Fusagasugá, Mosquera, Zipaquirá, Funza, Madrid y Cajicá; con las respectivas distribuciones asignadas [15].

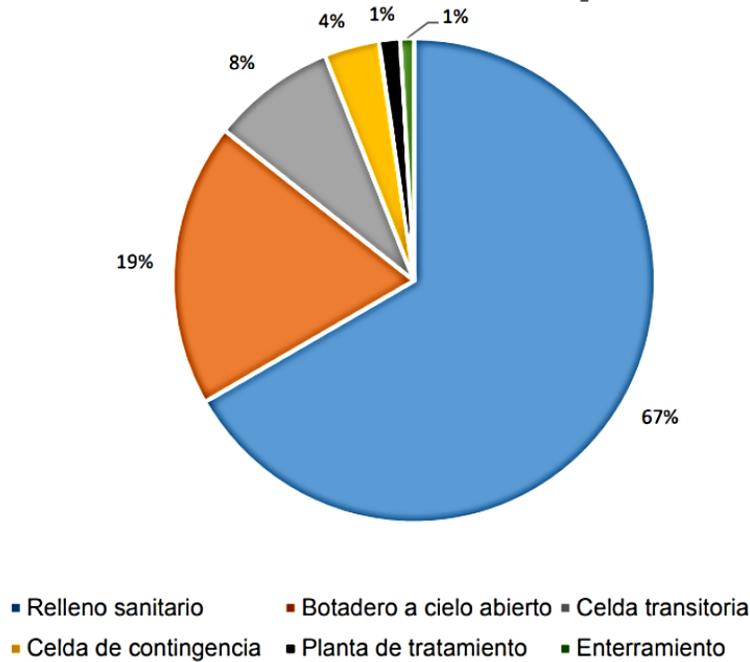
Teniendo en cuenta que la producción de residuos por habitante al día es de 0.69 kg y los datos del informe de Indicadores Ambientales Domésticos, del total aproximado de toneladas producidas al día (entre 918 ton y 1175 ton, en los 31 municipios, sin Bogotá), sólo el 12% (110 ton) merece realmente ser dispuesto en rellenos sanitarios, mientras que el 22% (201 ton) de materiales reciclables pueden ser aprovechados, como también el 66% (605 ton), correspondiente a la porción orgánica, que debería reciclarse como sucede en los ecosistemas no urbanizados [15].

La fracción de residuos que más se produce en los hogares, está compuesta por residuos orgánicos y comida que ya ha sido cocinada, lo que significa que de estos se producen 408,4 g/día por persona y particularmente estos desechos corresponden a cáscaras de papa, zanahoria, cebolla, plátano, banano, mandarina, cáscaras de huevos, restos de pimentón y manzana, bolsas de té, borra de café, hojas de mazorca [15].

De esta manera, acotando el esquema de separación en la fuente que realiza la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos – UAESP, tal como se observa en la Figura 3, se muestra la distribución de sistemas de disposición final que clasifican los residuos orgánicos generados en los hogares de Bogotá, en la zona urbana; en la que se encuentran además los establecimientos como centros comerciales, tiendas de alimentos, restaurantes y cualquiera que manipule productos alimenticios, además del sector rural [15].

Figura 3

Distribución de sistemas de disposición final



Nota: La figura representa la distribución de sistemas de disposición final. Tomado de R. A. C. Marú, M. Á. M. Quintero, G. C. A. Beltrán y S. H. C. Hernández, «Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos,» Bogotá D.C, 2017.

Según lo señalado en el CONPES en la Política Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, se debe tener en cuenta que la problemática ambiental generada por los residuos orgánicos representa el 61% de la generación de gases efecto invernadero (GEI), cuando son enterrados en los rellenos sanitarios [15]

Por tanto, uno de los factores que las autoridades gubernamentales tienen en cuenta al buscar darles un aprovechamiento alternativo a los residuos, es que, en toda su gestión, si no se opera correctamente, se generan enormes problemas de contaminación a las corrientes hídricas tanto superficiales como subterráneas. Por ejemplo, los lixiviados que se generan en el proceso de descomposición se filtran y van a parar directamente a los cuerpos de agua [15]

4. IDENTIFICAR LAS CONDICIONES Y LOS PARÁMETROS MÁS RELEVANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO

4.1. Materiales y métodos

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, como el estiércol y las basuras orgánicas. La composición química del biogás indica que el componente más abundante es el metano (CH_4); este es el primer hidrocarburo de la serie de los alcanos y un gas de efecto invernadero. La mezcla de CH_4 con el aire es combustible y arde con llama azul [16].

Es un combustible ecológico, ya que se obtiene en biodigestores por fermentación anaeróbica del estiércol de herbívoros; luego, cuando se quema el biogás, se produce CO_2 y agua; el CO_2 sale a la atmósfera, de donde es captado por las plantas para producir carbohidratos mediante la fotosíntesis, que los utilizarán para su crecimiento; estas plantas servirán de alimento a los herbívoros, cuyo estiércol se alimentará al biodigestor, de esta manera se completa el ciclo del CO_2 . La aplicación de este bioproceso contribuye a reducir la emisión de gases de efecto invernadero y por ende del calentamiento global, teniendo en cuenta que una molécula de metano capta aproximadamente 25 veces más calor que la molécula de CO_2 [16].

4.2 Perspectivas de la DA de la lista de materiales (BOM)

La DA de materiales orgánicos ha sido presentada como una tecnología adecuada para el tratamiento de los residuos y la producción de energía a partir de la generación de biogás [5]. En este sentido, afirman que la DA permite alcanzar dos objetivos fundamentales simultáneamente: el manejo adecuado de los biorresiduos y la producción de energía renovable. Adicionalmente, esta tecnología produce menos GEI comparada con otras modalidades de manejo de los RSM como la disposición final y la incineración. Se presentan las principales fuentes de residuos sólidos a partir de los cuales se genera gas metano para la producción de energía por medio de la DA. Señalan que la mayoría de los países en desarrollo generan grandes cantidades de estos residuos,

por lo cual su manejo a través de DA tiene un gran potencial para la generación de energía, especialmente a pequeña escala [17].

4.3 Fermentación anaeróbica

La materia orgánica en una fermentación anaeróbica es metabolizada mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad y en ausencia de un aceptor de electrones externo. El producto que se genera durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica es por esto que la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. En la fermentación, el sustrato es parcialmente oxidado y, por lo tanto, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva [9].

4.4 Respiración anaeróbica

La respiración anaeróbica no debe confundirse con la fermentación, el cual es un proceso también anaeróbico, pero en el que no participa nada parecido a una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica, mientras que la respiración anaeróbica es un proceso biológico de óxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica. Este proceso lo realiza exclusivamente algunos grupos de bacterias y para ello utilizan una cadena transportadora de electrones análoga a la de la mitocondria en la respiración aeróbica [18].

4.5 Etapa producción metano

Los microorganismos metanogénicos tienen la posibilidad de ser considerados como los más relevantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, debido a que son los causantes de la formación de metano y de la supresión del medio de los productos de los productos anteriores, gracias a estos microorganismos se le da el nombre al proceso de biometanización. En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas actúa sobre los productos resultantes de las

etapas anteriores. Estos microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica por medio de la formación de metano desde sustratos monocarbonados o con 2 átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2 / CO_2 , formato, metanol y varias metilaminas [9].

4.6 Factores determinantes en el proceso de producción de biogás

Es fundamental analizar ciertos de los componentes relevantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, en especial los metanogénicos, son enormemente propensos a los cambios en las condiciones del medio ambiente. Varios estudios han evaluado el funcionamiento de un sistema anaeróbico en funcionalidad de la tasa de producción de metano, pues la metanogénesis se estima que es un paso limitante del proceso [9]. Gracias a esto, la biotecnología anaeróbica necesita de un cuidadoso monitoreo de las condiciones del medio ambiente. Varias de estas condiciones son: temperatura (mesofílica o termofílica), tipo de materias primas, nutrientes y concentración de minerales, pH [9].

4.7 Composición de la materia orgánica

Para la fermentación los microorganismos metanogénicos requieren de suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa, el porcentaje más adecuado de contenido en sólidos es del 5% al 10% lo que indica que la biomasa más adecuada es la de alto contenido en humedad [9].

- **Humedad:** Cantidad de agua existente en la materia a utilizar. Se obtiene al secarse el material a $104^{\circ}C$, hasta que no pierda peso; la diferencia entre el peso inicial y el peso final es equivalente a la humedad que contenía la materia [9].
- **Sólidos totales:** Materia orgánica sin humedad, es decir, el peso de la materia seca que queda después del secado como se indicó antes. El sólido total suele ser equivalente al peso en seco (sin embargo, si se secan los materiales al sol, es de suponer que aun contendrán, cerca del 30% de

humedad). El sólido total incluye componentes digeribles o “sólidos volátiles” y residuos no digeribles o “sólidos fijos” [19].

- **Sólidos volátiles (SV):** Los sólidos volátiles son considerados como la materia que realmente es transformada por las bacterias. Es el peso de los sólidos orgánicos quemados cuando el material seco se enciende (se calienta unos 538 °C) [19].
- **Sólidos fijos (SF):** Material que no será transformado durante el proceso y es el peso que queda después del encendido (cenizas). Se trata de material biológicamente inerte. Los sólidos fijos son el residuo de los sólidos totales, disueltos o suspendidos, después de llevar una muestra a sequedad durante un tiempo determinado a 550°C [20].

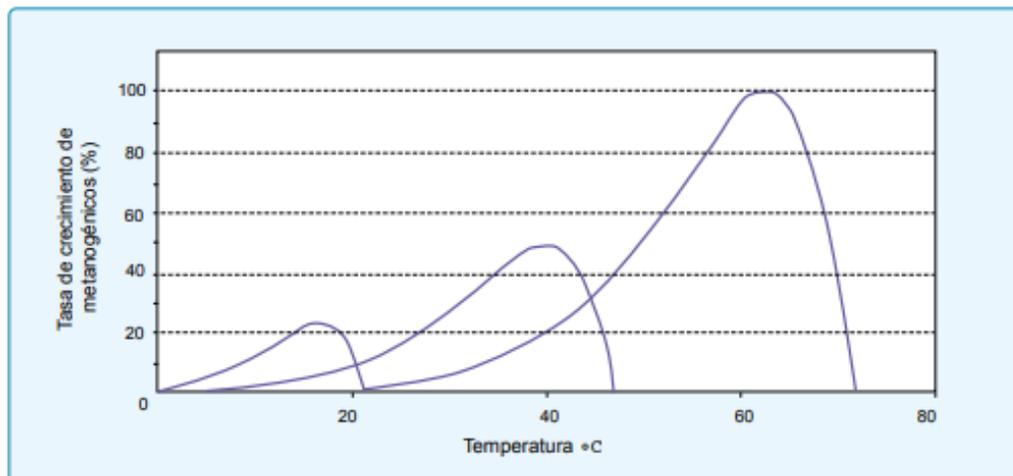
4.8 Temperatura

Los procesos anaeróbicos, de la misma manera que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la rapidez de desarrollo de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el cambio de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

Se puede considerar que existen tres rangos en los cuales los microorganismos anaeróbicos pueden trabajar correctamente: Psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C). La Figura 4 muestra un ejemplo de los rangos de operación y la tasa de crecimiento de los microorganismos anaerobios [9].

Figura 4

Tasa de crecimiento de los microorganismos anaeróbicos en los diferentes rangos de temperatura de operación



Nota: La figura representa los diferentes rangos de temperatura y la tasa de crecimiento Tomado de M. M. T. Varnero, «Fases de la digestión anaerobia,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.

4.9 pH

Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH, porque pueden ver afectada su actividad enzimática. De forma general, se establece que el pH adecuado para los microorganismos metanogénicos debe estar cercano a la neutralidad entre 7.8 y 8.2 [9].

4.10 Nutrientes

Los microorganismos deben tener disponible un cierto número de nutrientes mínimo para su desarrollo. Los más importantes son: carbono como fuente de energía; nitrógeno para la síntesis de proteínas; fósforo y potasio para la reproducción celular y el metabolismo; además, hacen falta trazas de otros nutrientes como el calcio, cobalto, magnesio y manganeso [9].

Uno de los mejores indicadores de la probable salud de los microorganismos es la razón de carbono a nitrógeno disponible, una proporción idónea C: N esta alrededor de 30:1 hasta 20:1; razones más altas inhiben el crecimiento de los microorganismos, ralentizando la descomposición; razones más bajas aceleran la tasa de descomposición pero pueden causar pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco y rápido agotamiento del oxígeno disponible lo que conduce a los malos olores típicos de situaciones anaerobias. En la tabla 3 se puede observar un ejemplo de diferentes razones C: N para diferentes tipos de materias primas [9].

Tabla 3

Razón de Carbono a Nitrógeno

RAZÓN DE CARBONO A NITRÓGENO DE DIFERENTES MATERIALES		
Materia prima		Razón C:N
Caña de maíz	Alto contenido de carbono	60:1
Fronda		40-80:1
Hojas secas y		90:1
hierbajos		50-60:1
RSU mezclados		500:1
Serrín		
Estiércol de vaca	Alto contenido en nitrógeno	18:1
Desperdicios		15:1
Recortes de césped		12-20:1
Mantillo		10:1
Hojas frescas		30-40:1
Podas de plantas no leguminosas		12:1

Nota: La figura representa la razón carbono nitrógeno de diferentes tipos de materiales tomada de: M. M. T. Varnero, «Fases de la digestión anaerobia,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.

5. COMPARACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE METANO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS ORGÁNICOS

5.1 Residuos orgánicos biodegradables

Los desperdicios agroindustriales tienen la posibilidad de clasificarse en 2 tipos en general: residuos de frutas o plantas y residuos provenientes de animales como los estiércoles y purines, estos desperdicios hacen parte de un amplio conjunto de residuos orgánicos biodegradables. En las últimas décadas los cambios socioeconómicos han propiciado la enorme producción periódica de residuos orgánicos biodegradables, los cuales necesitan de un funcionamiento específico para eludir la generación de impactos ambientales entre los cuales se encuentran problemas en la salud pública y el deterioro de los ecosistemas naturales [21].

Los desechos generados por el sector primario comprenden los residuos agrícolas, ganaderos y forestales; los desechos generados por el sector secundario incluyen los residuos industriales (agroalimentarios, textiles, curtiembres, residuos del papel, etc.); y, finalmente se encuentran los residuos producidos por el sector terciario de servicios dentro de los que se tienen dos grandes afluentes como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales domésticas [22].

5.2 Residuos ganaderos

Están formados por la acumulación de deyecciones sólidas y líquidas producidas en las explotaciones ganaderas. El uso eficiente de estos residuos sin que se produzcan daños en el medio, especialmente de los líquidos, es objetivo prioritario de muchos investigadores [23].

Las características de estos materiales son función de: especie, raza, alimentación del ganado y época del año. Las cantidades que se producen dependen del tipo de explotación, puesto que no serán las mismas las originadas en un establo de vacas que en una granja de aves [23].

La temperatura en el desarrollo de los procesos biológicos hace parte de uno de los criterios ambientales más importantes debido a que al encontrarse en relación proporcional de las

actividades que implican reacciones enzimáticas donde las enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura y ayudan al mejoramiento de grupos microbianos específicos [20].

Otra razón corresponde a los diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos durante el curso de la digestión, ya que cada uno de estos grupos, tiene una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo. En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia [23]. En la tabla 4 se muestran valores clásicos para deyecciones ganaderas.

Tabla 4

Referencias de producción de metano para deyecciones ganaderas

Referencia	Substrato	Tª	OLR	TR	NH ₄ ⁺	PC
Angelidaki y ahring, 1993	Estiercol bovino	55	3.00	15	1.5	0.2
					4	0.05
					6	0.05
			2.80	15	2.5	0.2
					3	0.2
					5	0.15
					6	0.15
					0.7	0.20
					4.2	0.16
Robbins et al. 1989	Estiercol bovino	37	2.63	16	1.4	0.21
					2.8	0.08
					1.04	0.49
		35	4.44	9	2.64	0.54
					4.33	0.40
					6.08	0.51
					7.74	0.09
Hashimoto, 1986	Estiercol bovino				9.12	0.40
			7.76	5	0.97	0.30
					4.36	0.30
					4.38	0.30
		55	8	5	5.4	0.29
					5.37	0.28
Hansen et al, 1998	purín de cerdo	37	3.00	15	5.9	0.19
		45	3.00	15	6	0.14
		55	3.00	15	6	0.07
		60	3.00	15	6.1	0.02
		37	3.0	15	5.9	0.19
		55	3.0	15	6	0.07

Nota: La Tabla representa Algunas referencias de producción de metano de las deyecciones ganaderas. Tomado de IDAE, «(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) “Biomasa: Digestores anaerobios”,» Energías Renovables, 2007.

La producción de metano o biogás que se puede obtener de un residuo determinado depende de su potencial (producción máxima), del tiempo de retención, de la velocidad de carga orgánica, de

la temperatura de operación y de la presencia de inhibidores en la tabla se puede observar que este tipo de residuos presentan una baja producción de metano debido a su elevado contenido en agua [4].

5.3 Identificación del potencial de metano por residuo

Tabla 5

Características de diferentes tipos de residuos

Origen	Residuos	Características		
		Relación C/N	SV/ST	%proteínas
Porcino [18]	Estiércol	20	0,72	13,2
Vacuno [18]	Estiércol	20	0,75	17
Aves [18]	Estiércol	20	0,77	20,5
Papa [35,36]	Hojas y tallos	40	0,58	1,9
Frijol [37]	Hojas y tallos	12	0,93	15,2
Arveja [37]	Hojas y tallos	11	0,93	20
Rosas y clavel [35,38]	Hoja de poda	13	0,87	2,2
Café [39,40]	Mucilago	20	0,68	21,4
	Pergamino	20	0,40	6,4
	Bagazo de caña	150	0,43	20
Caña panelera [41]	Caña	21	0,80	15,3

Nota: La Tabla representa las características de diferentes tipos de residuos y su influencia en la producción de metano. Tomado de O. K. T. Montenegro, C. A. S. Rojas, R. I. Cabeza y P. M. A. Hernandez, «Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca,» 2016.

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es un factor determinante en la producción de metano ya que a valores bajos de C/N se incrementa el riesgo debido al exceso de nitrógeno y a su vez también se presenta la inhibición del proceso, mientras que valores altos indican una deficiencia de nitrógeno para la síntesis de biomasa. Para los valores de C/N entre 20-30 son positivos para el proceso e incrementan el rendimiento y el potencial de metano [9] Conforme con la tabla 5 la relación C/N obtenida para el estiércol producido por especies bovinas, porcinas y avícolas es de 20 lo que representa un valor positivo y adecuado para aumentar el rendimiento y el potencial de metano [9].

Se puede decir que estos residuos son capaces por sí solos de mantener el proceso de digestión anaerobia. Por otro lado, las elevadas relaciones de SV/ST garantizan disponibilidad de materia

biodegradable para la producción de metano. No obstante, el rendimiento de la producción de metano se puede ver perjudicado por la existencia de un elevado porcentaje de proteínas debido a que serían causantes de la baja biodegradabilidad del residuo gracias a los productos intermedios de su degradación [11].

5.4 Comparación del contenido orgánico, sólidos volátiles y producción de metano

Los residuos orgánicos de la industria alimentaria presentan potenciales de producción variables, pero usualmente elevados cuando contienen un elevado contenido en lípidos [4]. En la tabla 6 se puede observar la producción de biogás obtenida según el contenido orgánico.

Tabla 6

Comparación del contenido orgánico, sólidos volátiles y producción de metano

TIPO	CONTENIDO ORGÁNICO	SOLIDOS VOLÁTILES (%)	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (m³ / TONELADA)
Intestinos + contenidos	Hidratos de carbono, proteínas, lípidos	15-20	50-70
Fangos de flotación	65-70% proteínas, 30-35% lípidos	13-18	90-130
BBO (tierras filtrantes de aceites, con bentonita)	80% lípidos, 20% otros orgánicos	40-45	350-450
Aceites de pescado	30-50% lípidos	80-85	350-600
Suero	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	7-10	40-55
Suero concentrado	75-80% lactosa, 20-25% proteínas	18-22	100-130
Hidrolizados de carne y huesos	70% proteínas, 30% lípidos	10-15	70-100
Mermeladas	90% azúcares, ácidos orgánicos	50	300
Aceite soja/margarinas	90% aceites vegetales	90	800-1000
Bebidas alcohólicas	40% alcohol	40	240
Fangos residuales	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	3-4	17-22
Fangos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos, proteínas	15-20	85-110

Nota: La Tabla representa la comparación del contenido orgánico, sólidos volátiles y producción de metano. Tomado de IDAE, «(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) “Biomasa: Digestores anaerobios”,» Energías Renovables, 2007.

En la columna 4 se puede observar que la mayor cantidad de biogás (800-1000 m³/ton) se produce por medio de los aceites vegetales y la más baja producción (17-22 m³/ton) se encuentra en los fangos residuales esto debido a la baja concentración de materia orgánica y el alto contenido de agua.

5.5 Experiencias en la digestión anaerobia de biorresiduos

La tabla 7 proporciona información sobre la aplicación de la DA según diferentes autores en diferentes tipos de reactores y con diferentes combinaciones de sustratos, teniendo en cuenta ciertas variables importantes en el proceso como: Temperatura, ST, TR, importantes para la producción de biogás. Debido a que las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás.

En la tabla 7 se puede observar que la mayor temperatura es 55°C lo cual implica una disminución en los tiempos de retención requeridos obteniendo tiempos entre los 10 y los 30 días y consecuentemente se pueden observar menores volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material [9].

Tabla 7

Experiencias en la digestión anaerobia de biorresiduos

Tipo de reactor	Volumen (L)	Sustrato	T (°C)	ST (%)	CO (kgSV ³ m ⁻³ d ⁻¹)	TR (días)	Producción de CH ₄ (mL ³ g SV ⁻¹)	Producción de biogás (mL ³ gSV ⁻¹)	CH ₄ (%)	Reducción SV (%)	Fuente
Batch y Semicontinuo	4, 9 y 1600	Biorresiduos + lodos de AR	35	0-70	1,1-6,4	15-30	-	50-510	50-62	46-77	(Diat et al. 1981)
UASB + Reactor de dos fases	10000 y 80000	Biorresiduos	35-55	-	8-15	15-30	-	380-460	65	58-60	(Hofenk et al. 1984)
Semicontinuo	2200 y 3000	Biorresiduos+ lodos de AR	35	20	2,1-4,2	14-25	-	620-640	62-63	67-69	Mata et al. (1990)
CSTR	3,5	Biorresiduos	37	5	1,6-3,4	14-30	-	500-520	62-63	70-81	(Rivard et al. 1991)
SEBAC	700	Biorresiduos	55	30	5,2-12,4	20-42	-	570-690	55	-	(Vermeulen et al. 1993)
Dos fases (hidrolización y metanogénesis)	0,5 y 1,3	Biorresiduos	35	6	3,1-12,6	5-18	-	200-460	49-64	27-53	(Mtz et al. 1995)
Batch (Completamente mezclado)		Biorresiduos+Lixiviado+Lodos ARD	55	25	11,7	150	-	-	70	-	(Díaz et al. 1997)*
Semicontinuo	3,3 x 10 ⁶	Biorresiduos	40	30	3,8-10,5	20-55	-	350-480	-	-	(De Lacroix et al. 1997)
Dos fases (hidrolización y metanogénica)	30	Residuos de cocina	35-55	-	6	11	-	800-830	-	72-80	Schober et al. (1999)
Batch	2	RSM+inóculo	25-29	3,2	-	240	-	564	70	76	(Rao et al., 2000)
2 CSTR y un UASB	9-30	Biorresiduos +Lodo ARD	36-56		0,67	17,3-44,2	24	-	60	-	(Sosnowski et al. 2003)
Semicontinuo	0.5	Biorresiduos+ Lodos ARD+ Lodos digestor avícola	20-40	8-12		145	33,8	-	60	67,4-77,1	(Castillo et al. 2003)*
Reactor empacado + UASB	4,5-19,4	Biorresiduos + Estiercol de vaca+Estiercol de cerdo+Suelo	35	-	-	118	183-372	131-310		85-90	Alzate et al. (2003)
Tubular	18	Residuos de comida	35	6	75,9	20	-	707	57	75,9	(Boutgalli et al. 2003)
Batch	8	Residuos orgánicos de	18-	-	-	25-85	-	-	-	-	(Cardona et al.

Tipo de reactor	Volumen (L)	Sustrato	T (°C)	ST (%)	CO (kgSV ³ m ⁻³ d ⁻¹)	TR (días)	Producción de CH ₄ (mL ³ g SV ⁻¹)	Producción de biogás (mL ³ gSV ⁻¹)	CH ₄ (%)	Reducción SV (%)	Fuente
		plaza de mercado+ Lodos ARD	35								2004)*
Dos fases (hidrolización y metanogénesis)	18	Residuos de comida	35-55	-	7,5	20	-	705-997	61-64	-	(Bouallagui et al. 2004)
Batch	-	Residuos de restaurantes+ Rumen bovino	55	20-50	-	60			4,1-67	-	(López y Beltrán,2005)*
Continuo y Batch	18,8-50	Residuos de cocina+ Lixiviado+ Lodo ARD	35	13	-	95	-	-	53-68	75	(Carneiro,2005)
Semicontinuo	30	Biorresiduos de plaza de mercado+Lodo de un digestor de excretas procinas	35-55	16,7	-	10-15	-	-	-	-	(Castillo, 2005)*
Semicontinuo	14	Biorresiduos municipales + Lodos de un digestor de biorresiduos	37	-	0,97	17	300	800	58	73	(Fernández et al, 2005)
CSRT	4,5	Biorresiduos municipales + Gallinaza	55	-	4	18	460	710	64	74	(Hartmann and Ahring 2005)
CSRT	4,5	Biorresiduos municipales +Lodos ARD	55	-	11,4	15	430	710	64	30	(Angelidaki et al. 2006)
Escala real	2,2 x10 ⁶	Biorresiduos municipales+Lodos ARD	36-39	-	4-6	40-60	400	-	56	78	Bolzonella et al. (2006)
Semicontinuo y Batch	5	Residuos sólidos municipales + Lodos ARD	26-36	-	0,5-4,3	25	-	360	68-72	88,1	(Elango et al. 2007)
Dos fases (hidrolización y metanogénesis)	30	Biorresiduos municipales+Lodos ARD	35-38	-	-	10-15	-	-	-	-	(Sandoval et al. 2007)*
Escala piloto	35	Biorresiduos municipales +Lodos ARD	55	-	2,8	15	430	710	64	30	(Davidsson et al. 2007)
2 Reactores flujos ascendentes +UASB	1-7,5	Biorresiduos municipales+ ARD+ Lodos ARD	38	35	4,7	1	170-290	-	50	92-97	(Gaviria et al. 2008)
Dos fases (hidrolización y	24	Biorresiduos de plaza mercado+Lodo ARD+Lodo	35-55	-	-	10-15	-	-	-	-	(Castillo et al., 2008)*

Tabla 7. Continuación

metanogénesis)		digestor excetrar porcinas									
Batch	208	Biorresiduos de plaza de mercado+ARD+ Estiercol bovino	18-22	-	-	104	-	-	-	-	(Bogota et al., 2008)*
Batch	1.7	Biorresiduos +Lodos ARD	35	20	-	15	-	-	80	-	(Fernández et al., 2010)
Batch	0,53	Residuos cítricos+Lodos ARD+ Estiercol bovino	30	-	-	40	90-110	300-900	60-65	-	(Cendales, 2011)*
Batch	1	Biorresiduos plazas de mercado+ Lodo de un digestor de biorresiduos+Excreta porcina	55	13,2-18,9	-	30	-	750-1100	40-68,5	55	(Fantozzi & Cinzia, 2011)
Escala laboratorio	2000	Residuos de flores+Excreta bovina	20-60	-	-	-	-	-	50	-	(Singh & Bajpai, 2012)
Escala de laboratorio	-	Residuos de frutas y verduras	37	-	2	60	-	560	65	48	(Mosos et al., 2012)*
Batch	0,2	Residuos de comida+ Lodos ARD	37	-	-	30	221-283	-	49-70	-	(Elbeshbishy et al., 2012)
Batch y Continuo	1,2,2,3, y 5,5	Residuos de manzana+Lodo ARD+ Excreta porcina	36-55	-	2,5-5	30	-	-	49,3-81,3	-	(Krishna et al., 2013)
Batch	0,4	Biorresiduos municipales + Lodo ARD	37	3-4,5	-	30	99-571	-	-	-	(Cabbai et al., 2013)
Batch	1	Residuos de comida y poda+ Efluentes de ARD+ Lodos ARD	36	15-94,3	-	30	10-120	-	50-70	20-40	(Brown & Yebo, 2013)

Nota: La Tabla representa las experiencias en la digestión anaerobia de biorresiduos. Tomado de Univalle, «Producción de metano a partir de la digestión,» 2014.

En los resultados obtenidos de los diferentes autores se puede observar varios tipos de reactores o también conocidos como biodigestores. Un biodigestor se puede definir como un contenido hermético el cual es alimentado con materia orgánica (MO) donde se realiza un proceso de descomposición anaerobia [20]. Los biodigestores se pueden definir como son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás esto a partir de desechos agrícolas, estiércol o efluentes industriales, entre otros, los cuales permiten así la obtención de energía limpia y de bajo costo a partir de una fuente renovable [24]

Se puede observar también que para el proceso de DA se necesita establecer principalmente un tipo de digestor, un rango de temperatura de trabajo (entre las más utilizadas mesofílica o termofílica) y el número de etapas (una o dos). El proceso que se lleva a cabo en el digestor Batch consiste en cargar la materia prima en un solo lote hasta que el rendimiento del biogás y el contenido de la materia prima disminuya, luego se carga de nuevo y se inicia un nuevo proceso de fermentación [25] Según la tabla se puede observar que la mayor producción de biogás (750-1100 mL*gSV⁻¹) se alcanzó en un reactor Batch a una temperatura de 55°C. Adicional a esto, también se encontró que para un reactor Batch cargado con biorresiduos más lodos ARD a una temperatura termofílica de 35°C se generó el mayor porcentaje de producción de metano (80%) con un tiempo

de retención de 15 días. El interés primordial del biogás es metano, ya que es el compuesto de mayor valor energético del gas. La proporción de biogás producido y el contenido de metano en la etapa gaseosa dependen del residuo, su degradabilidad y su estado de oxidación. A mejor degradabilidad y más bajo estado de oxidación, se producirá más metano.

El factor más común usado para explicar la concentración de materia orgánica degradable en desperdicios es el contenido de sólidos volátiles (SV). Dado que los sólidos volátiles y el potencial biológico de metano tienen una relación directamente proporcional, a mayor porcentaje de remoción de sólidos se conseguirá un mayor porcentaje de producción de metano porque se estará convirtiendo la mayor cantidad de materia orgánica en metano.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales [9].

Esta comparación demuestra que la biomasa es un excelente sustrato para la producción de biogás teniendo en cuenta que los parámetros que caracterizan la digestión anaerobia sean los adecuados para este proceso, esto se puede conseguir creando un biodigestor con las propiedades físicas y técnicas apropiadas. Con la producción del biogás usando como materia prima el sustrato estudiado, se concluye que es necesario aprovechar dichos materiales orgánicos, abundantes en las zonas rurales de nuestro país, para facilitar alternativas de energía a bajo costo al medio rural.

Todo material orgánico como los desperdicios bovinos, avícolas, porcinos, desperdicios de plantaciones y desperdicios de plantas procesadoras de alimentos poseen el potencial de generar metano esto bajo ciertas condiciones como las que se especificaron en el presente documento [26].

6. CONCLUSIONES

En el primer objetivo se concluyó que debido a las diferentes problemáticas encontradas la producción del metano es un recurso energético que constituye una opción hacia la transición energética, ya que puede ser empleado como combustible para generar electricidad, calor y/o energía mecánica a partir de una fuente renovable como los residuos orgánicos, agropecuarios, agroindustriales y municipales, entre otros. Por otra parte, desempeña un papel importante en la mitigación de la producción del metano de efecto invernadero.

El análisis de la distribución de las fuentes potenciales para la producción del metano provenientes del sector ganadero, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento es complejo y está relacionada con otros factores (sociales, desarrollo científico, disponibilidad de la tecnología, etc.). Decir que dichos resultados son concretos es inverosímil. No obstante, son un panorama preliminar que posibilita visualizar los nichos de posibilidad para la producción del metano. Los desechos sólidos (altos en contenido de materia orgánica) no deberían ser considerados como un problema, al contrario, como una oportunidad para la generación de una fuente renovable de energía y una medida efectiva para la mitigación de la producción del metano en efecto invernadero.

En el segundo objetivo se identificó que existe diversidad de literatura sobre el tema de estudio sobre el cual se ha recogido información de manera general, se evidencia que la tecnología que más se utiliza para el manejo de los residuos orgánicos es la DA. Posteriormente, se encuentra que los parámetros más importantes a considerar en el proceso de formación de metano son: Temperatura, en el cual se determina como poco viable el rango psicofílico debido a que requiere de un tamaño de reactor mayor y como el más utilizado el mesofílico, aunque el termofílico se está implementando cada vez más para conseguir mayor agilidad en el proceso, pH siempre cercano a la neutralidad entre 7.8 y 8.2, relación C/N en un rango de 30:1 a 20:1.

Al final, en el tercer objetivo se hizo evidente con relación a las diversas experiencias conseguidas en la DA que esta tecnología constituye una buena elección para tratar residuos con alta materia orgánica biodegradable, por consiguiente, este procedimiento además está indicado para mezclas de residuos orgánicos de distinto origen y estructura, aprovechando la sinergia de las

mezclas y compensando las carencias de cada residuo por separado, lo cual se conoce como codigestión anaerobia.

En las zonas rurales de Colombia existe un potencial significativo para la producción del biogás, mediante la aplicación de tecnologías que permitan aprovechar económicamente diversos residuos agropecuarios y agroalimentarios, muy contaminantes y emisores de generación de gases de efecto invernadero (GEI). Los resultados de esta evaluación tienen la posibilidad de favorecer con información en los procesos de toma de decisiones que contribuyan al desarrollo nacional de la bioenergía, enfocada a reemplazar el uso de combustibles fósiles y a disminuir el efecto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. C. Sánchez, I. M. E. Patiño, F. J. L. Alcántara, O. Y. Reyes, C. M. A. Pérez y M. E. Ortiz, «Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares,» *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 32, pp. 191-198, 2016.
- [2] CCA, « Comisión para la Cooperación Ambiental, Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético,» 2017. [En línea]. Available: <http://www3.cec.org/islandora/fr/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>.
- [3] CSP, «Consortio de servicios de la palma, que son los residuos organicos,» [En línea]. Available: <http://www.cslapalma.org/5cubitos/que-son-los-residuos-organicos>.
- [4] IDAE, «(Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) “Biomasa: Digestores anaerobios”,» *Energías Renovables*, 2007.
- [5] Aerbur, *Digestión anaerobia*, Colombia: Compt, 2013.
- [6] G. Silvestre, «¿Por qué la fermentación oscura puede ser una alternativa sostenible para valorizar residuos?,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.ainia.es/insights/por-que-la-fermentacion-oscura-puede-ser-una-alternativa-sostenible-para-valorizar-residuos/>.
- [7] E. Metcalf, *Ingeniería sanitaria tratamientos evacuacion*, Francia: bibliored, 2015.
- [8] P. R. A. Huertas, «Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria,» *Producción + Limpia*, vol. 10, nº 2, 2015.
- [9] M. M. T. Varnero, «Fases de la digestión anaerobia,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.
- [10] Acuña, *Tratamiento de residuos orgánicos y Recuperación de residuos reciclables.*, Bogota: Crimentealh, 2019.
- [11] O. K. T. Montenegro, C. A. S. Rojas, R. I. Cabeza y P. M. A. Hernandez, «Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca,» 2016.

- [12] Y. C. Rivera, «Biotecnología: investigación aplicada en el aprovechamiento de los residuos sólidos,» [En línea]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005609/DocumentosOffice/viernes/ModulodeGestiondelosResSolToxPeli/ponenciaacodalYisethCaicedo.pdf>.
- [13] Univalle, «Producción de metano a partir de la digestión,» 2014.
- [14] R. A. C. Marú, M. Á. M. Quintero, G. C. A. Beltrán y S. H. C. Hernández, «Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos,» Bogotá D.C, 2017.
- [15] R. L. Gutiérrez, «La generación de residuos orgánicos en Cundinamarca y sus mecanismos de aprovechamiento en la generación de energías limpias».
- [16] C. V. S. D. B. L., P. M. R. Díaz, J. Suárez y A. Palacios, «Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores,» Pastos y Forrajes, vol. 35, n° 2, 2012.
- [17] A. Sáez y G. J. A. Urdaneta, «Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe,» Omnia, vol. 20, n° 3, pp. 121-135, 2014.
- [18] N. V. L. Franco y F. Parés, «Respiración Anaeróbica,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/3ronatfotosintesis/procesos-relacionados-con-la-fotosintesis/2--respiracion-anaerobica>.
- [19] A. E. A. Reyes y C. E. Pérez, «Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás,» Revista científica de FAREM-Estelí, 2019.
- [20] A. E. A. Reyes, «Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos,» Revista Científica de FAREM-Estelí, n° 24, pp. 60-81, 2018.
- [21] C. E. D. Ladino, «Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable,» 2011.
- [22] Ambientum, «Residuos agrícolas y forestales,» 2021. [En línea]. Available: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/residuos_agricolas_y_forestales.asp.

- [23] Agencia Extremeña de la Energía, «Los residuos ganaderos 2007-2013,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.agenex.net/images/stories/deptos/los-residuos-ganaderos.pdf>.
- [24] S. O. Rivas, V. M. Faith y W. R. Guillén, «Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad,» *Tecnología en Marcha*, pp. 39-46, 2010.
- [25] N. N. Ortiz, «Potencial técnico para la producción de biogás,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Navarro%20Natalia.pdf>.
- [26] J. Giubi, M. Bernal y F. Cañete, «Producción de Biogás a partir de residuos orgánicos generados en el Hospital de Clínicas: Un estudio preliminar,» 2019.

