

**DISEÑO Y MONTAJE DE UN PROTOTIPO A ESCALA LABORATORIO PARA EL
ANÁLISIS DE PROCESOS DE BIODIGESTIÓN A PARTIR DE DIVERSOS RESIDUOS
DE BIOMASA**

LIZETH ANDREA BARRERA PROAÑOS



**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA DE QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**DISEÑO Y MONTAJE DE UN PROTOTIPO A ESCALA LABORATORIO PARA EL
ANÁLISIS DE PROCESOS DE BIODIGESTIÓN A PARTIR DE DIVERSOS RESIDUOS
DE BIOMASA**

**DESIGN AND ASSEMBLY OF A LAB SCALE PROTOTYPE FOR ANALYSIS OF BIO
DIGESTION PROCESSES WITH VARIOUS BIOMASS RESIDUES.**

LIZETH ANDREA BARRERA PROAÑOS

**TRABAJO DE GRADO
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA**

**DIRECTOR
DR. ING. CARLOS ANDRÉS FORERO NÚÑEZ**

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA DE QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
MAYO, 2017**

CONTENIDO

1. Resumen	4
2. Abstract.....	4
3. Introducción.....	5
4. Metodología	7
5. Resultados y discusión.....	9
5.1. Experimento 1	9
5.2. Experimento 2.....	11
5.3. Experimento 3.....	14
5.4. Análisis del biogás generado	16
5.5. Análisis del abono	17
5.5.1. Espectrometría infrarroja (FTIR).....	18
6. Conclusiones.....	20
7. Recomendaciones.....	20
8. Agradecimientos	21
9. Bibliografía.....	21

DISEÑO Y MONTAJE DE UN PROTOTIPO A ESCALA LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DE PROCESOS DE BIODIGESTIÓN A PARTIR DE DIVERSOS RESIDUOS DE BIOMASA.

DESIGN AND ASSEMBLY OF A LAB SCALE PROTOTYPE FOR ANALYSIS OF BIO DIGESTION PROCESSES WITH VARIOUS BIOMASS RESIDUES.

Lizeth Andrea Barrera Proaños, estudiante de ingeniería química Universidad Jorge Tadeo Lozano, Lizetha.barrerap@utade.edu.co

1. Resumen

La biodigestión es una reacción estrictamente anaeróbica donde la materia orgánica produce biogás y otros subproductos de valor agregado como los abonos. El uso de biocombustibles como el biogás ha tomado fuerza en los últimos años, por su economía y aprovechamiento de diversos residuos orgánicos. Este trabajo busca diseñar un sistema de biodigestión a escala laboratorio promoviendo la investigación de energías renovables en la Universidad Jorge Tadeo Lozano, basado en el diseño del biodigestor de la Universidad de Ciencias Aplicadas Hochschule Offenburg, utilizando residuos como el estiércol de vaca (EV) y residuos de restaurante como material inóculo (MI), buscando controlar variables de diseño como la temperatura, pH y dilución estiércol:agua (E:A). Por medio de las pruebas de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) a las muestras antes y después de la bioreacción es posible observar grupos funcionales típicos de las fases de la biodigestión como hidrólisis y acidogénesis. A partir de la caracterización a la biomasa se observa el enriquecimiento en algunos nutrientes, lo cual influye en que esta pueda ser utilizada como abono. El diseño será modificado con el fin de ir corrigiendo errores de diseño y lograr una medición más sofisticada

Palabras clave: Biodigestión, biogás, metano, anaerobio, energía renovable.

2. Abstract

Bio-digestion is a strictly anaerobic reaction in which organic matter produces biogas and other by-products of added value such as fertilizers. Due to taking advantage of organic waste and its cheap means of production, the usage of biofuels like biogas has been strengthened in the last years. This project aims to design a lab scale bio-digestion system, promoting research in removable energies in the Jorge Tadeo Lozano University, and it's based on the biodigester design of the Hochschule Offenburg university of applied sciences, utilizing cow manure (CM) and restaurant wastes as inoculum material (IM) as waste, looking to control design variables such as temperature, pH, and manure:water (M:W) dilution. Through Fourier Transform Infrared Spectroscopy tests to the samples before and after the bioreaction, typical functional groups from phases of bio-digestion like hydrolysis and acidogenesis are identified. From characterization to biomass, enrichment in certain nutrients was observed, which influences the viability for it to be used as manure. The design shall be modified in order to correct design errors and to achieve a more sophisticated measurement.

Key words: Bio digestion, biogas, methane, anaerobic, renewable energy.

3. Introducción

El biogás es un biocombustible que ha tomado fuerza en los últimos años ya que además de ser económico, aprovecha diferentes tipos de desechos orgánicos, como por ejemplo aquello de industrias agrícolas y granjas, ayudando así, a la reducción de la contaminación y a la disminución de malos olores. La energía proporcionada por el biogás es usada en su mayoría para fines térmicos en instalaciones domesticas como estufas y hornos. Además, en lugares importantes de nuestro país, por ejemplo en el Jardín Botánico de Bogotá se genera energía a partir de desechos que producen algunas plantas; también, en Medellín, se genera biogás a partir de los residuos presentes en el Relleno Sanitario de la Pradera (Gonzales 2014).

El biogás está formado principalmente por metano y CO_2 , en una proporción aproximada de 60 y 40% respectivamente, pero la cantidad de metano varía según el material utilizado como materia prima. La cantidad de metano producido durante el proceso de fermentación anaeróbica puede predecirse por medio del coeficiente de generación de biogás que para el estiércol bovino es de $0.04\text{m}^3/\text{kg}$ húmedo (Varnero 2011).

Por otra parte, el biodigestor es un recipiente cerrado, hermético e impermeable donde se realiza un proceso de fermentación anaerobia de materia orgánica de origen animal y/o vegetal (biomasa). El proceso de descomposición de la materia se divide en tres etapas:

Inicia con una hidrólisis donde las moléculas con un peso molecular elevado, se rompen mediante enzimas de ciertas bacterias; por ejemplo los polisacáridos pasan a ser mono y disacáridos, aumentando así la solubilidad de la materia orgánica. Posteriormente, ocurre la fase de acidificación en la cual las bacterias descomponen la materia hasta formar ácidos simples, ácido acético, etanol, entre otros. En las etapas uno y dos, no se produce metano, pero si se forman compuestos que son utilizados por las bacterias productoras de dicho compuesto. Finalmente, está la etapa productora de metano, donde las bacterias toman los subproductos anteriores y los transforma en metano; dichas bacterias son muy sensibles al oxígeno por lo que se requiere estrictamente un ambiente completamente anaeróbico (Ed. Tecnológica de Costa Rica 1985).

Para que se realice correctamente la fermentación de la biomasa, se deben controlar algunos parámetros como lo son: el pH, la temperatura y también la cantidad de oxígeno(Alvaréz 2014).

Los microorganismos que realizan la fermentación de la materia orgánica necesitan estrictamente la ausencia de aire, ya que en dichas condiciones las bacterias forman CH_4 (metano) pero de presentarse la mínima cantidad de oxígeno se empieza a producir CO_2 ; por lo anterior es importante que el biodigestor sea completamente hermético. Como se dijo anteriormente, la temperatura es otro factor importante en la producción de biogás y aunque este puede producirse entre los 5 y 60°C , la cantidad producida varía según la temperatura, de manera que a mayor temperatura mayor cantidad de biogás; entre 47 y 55°C , se pueden llegar a producir de 2 a 2.5m^3 de gas por volumen del biodigestor y por el contrario a una temperatura ambiente normal de 22 a 28°C se producen en promedio de 0.2 a 0.5m^3 por volumen del tanque; por lo que se puede calentar el tanque biodigestor para aumentar la producción de biogás (Ed. Tecnológica de Costa Rica 1985).

Además, se debe controlar el pH ya que el proceso requiere un pH neutro, que varíe entre 6.6 y 7.6. Otro parámetro que se debe tener en cuenta es la agitación, ya que tanto la materia prima necesaria para la producción de biogás como las bacterias se acumulan en

la zona baja del tanque, además, también puede formarse una capa lipídica en la parte superior que impida el paso del gas; por lo anterior, es muy importante que el tanque biodigestor se encuentre en una constante agitación (Ed. Tecnológica de Costa Rica 1985).

Una investigación realizada en la Universidad de Guanajuato buscó producir biogás a partir de estiércol de cabra por medio de dos experimentos a escala laboratorio, uno con matraces kitazato y otro en un pequeño biodigestor de acero inoxidable con 9 litros de capacidad. Para ambos experimentos las muestras iniciales fueron tratadas de la misma manera, se eliminó la humedad en una estufa a 100°C durante 24 horas y posteriormente se pasaron a un desecador para enfriarlas hasta temperatura ambiente y se diluyeron una relación de 1:2.5 excremento agua. En el primer experimento, se introdujo la dilución en matraces de 1 litro conectados con mangueras, que a su vez fueron introducidos en tinas con agua calentada por una resistencia (figura 1) para así mantener una temperatura óptima y se realizó la medición del biogás generado por el volumen de líquido desplazado. Luego, el segundo experimento se realizó en un biodigestor como se muestra en la figura 1 lado derecho, fabricado en acero inoxidable para evitar la corrosión con tapa hermética, válvula de seguridad y de paso para la extracción de biogás, y para el calentamiento de dicho biodigestor se utilizó una parrilla en la parte inferior y la presión fue controlada por medio de un manómetro conectado al tanque; finalmente la medición del volumen de biogás producido fue por medio de una cámara de balón (Magaña et al. 2006).

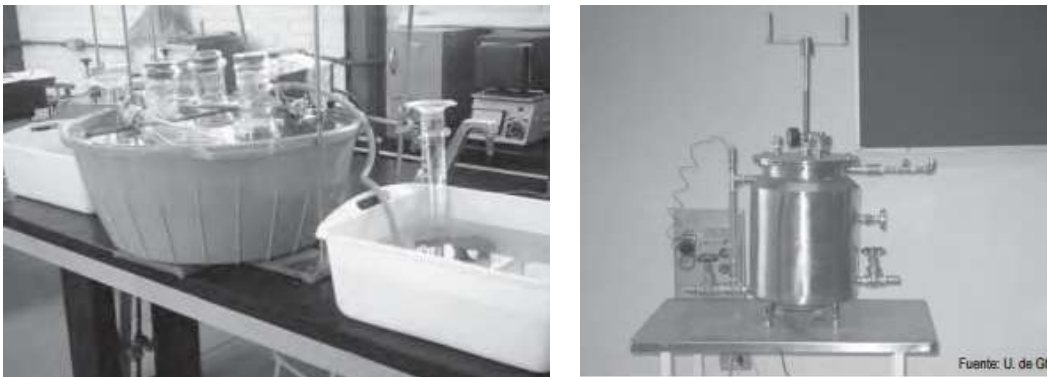


Figura 1: Biodigestor a escala laboratorio con matraces (Izq.) / biodigestor a escala laboratorio en acero inoxidable (Der.)[5]

Otro estudio realizado por la UPM, en Malasia, buscó generar biogás a partir de residuos orgánicos domiciliarios (DOD), estiércol de vaca (EV) y material inoculo (MI). Las muestras se mantuvieron congeladas a -2°C hasta que fueran introducidas al biodigestor. Se realizó la experimentación en cuatro biodigestores diferentes comparando a su vez el rendimiento de las muestras según el contenido de cada material, ya fueran de DOD, EV y/o MI. Este artículo a diferencia con el nombrado anteriormente realizado en la Universidad de Guanajuato, realiza un barrido con nitrógeno antes de hacer la carga de material, con el fin de eliminar el aire dentro del biodigestor que puede afectar la fermentación anaeróbica, además no utiliza un baño de agua calentada por una resistencia sino que lo hace por medio de una plancha de agitación magnética (figura 2), favoreciendo así tanto el control de la temperatura como el de la agitación, factores importantes en el proceso de biodigestión. La recolección de biogás en este ensayo se realiza por medio de una bolsa FlexFoil y la medición de gas recogido fue también por arrastre de agua como se muestra en la figura 2 (Khairuddin et al. 2016).

1. Plancha de agitacion magnetica
2. Frasco Schott
3. Salida efluente
4. Alimentacion
5. Tuberia de gas
6. Valvula de gas
7. Bolsa de biogas
8. Dispensador de agua para la medición

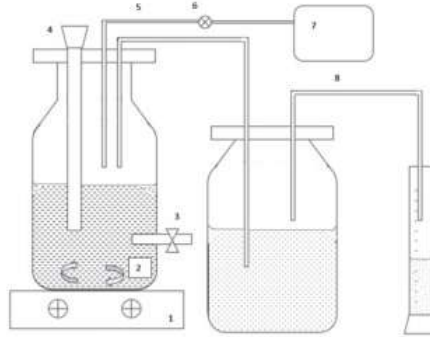


Figura 2: Biodigestor escala laboratorio con agitación magnética [6]

A lo largo de la investigación se buscó diseñar un sistema de biodigestión a escala laboratorio el cual permitiera el análisis del comportamiento a partir de diversos residuos de biomasa ya que la Universidad Jorge Tadeo Lozano, cuenta con una línea de investigación en energías alternativas y medio ambiente, pero no tiene sistemas de prototipo para el análisis del potencial energético de residuos orgánicos, por lo que este trabajo busca dejar material de investigación para futuras generaciones, no sólo del grupo de Energía, Ambiente y Desarrollo (EADE), sino también para uso abierto de la universidad.

4. Metodología

Con el apoyo de la Universidad de Ciencias Aplicadas Hochschule Offenburg con la cual el grupo de investigación en Energía, Ambiente y Desarrollo EADE, tiene una actividad de investigación conjunta se llevaron a cabo una serie de etapas para el desarrollo del proyecto. Inicialmente se realizaron cálculos necesarios para saber los parámetros iniciales de diseño; en la propuesta del mismo, se habló acerca de un análisis estequiométrico para así lograr conocer el volumen de biogás generado a partir de cierta cantidad de biomasa, sin embargo resultaba bastante difícil ya que la composición de cada una de las muestras de estiércol varía. Lo anterior fue reemplazado por el factor de generación de biogás el cual resulta de datos previos experimentales y es un valor aproximado de volumen de biogás a partir de los kilogramos de biomasa utilizados [2]. Además, se decidieron cuáles parámetros permanecerían constantes y cuáles variarían en cada uno de los experimentos. Basados en la literatura se decidió variar la dilución E:A en los tres primeros reactores del experimento inicial de la siguiente manera; 1:1, 1:2, 1:3, respectivamente. Posteriormente, recopilando los prototipos modelo del estado del arte, se eligió el modelo a construir, el cual se realizó por triplicado para así poder variar la dilución.

El material orgánico seleccionado para el primer experimento fue el estiércol de vaca (EV) ya que tiene un buen coeficiente de generación de metano, 0.04m^3 biogás/kg EV húmedo, y además su recolección es bastante simple. Sabiendo el material con el cual se va a trabajar se calcularon los datos teóricos de biogás generado como muestra la tabla 1, tomando la densidad del estiércol y agua como 993 y 1000 kg/m^3 respectivamente. El estiércol fue recolectado en una finca a las afueras de Bogotá asegurando que estuviera lo más fresco posible, y para mantener sus propiedades se mantuvo refrigerado hasta el momento de la alimentación a los reactores.

Tabla 1: Cálculos teóricos de volumen de biogás

DILUCIÓN	Kg Estiércol	m3 Estiércol	m3 Agua	Kg Agua	kg Estiércol húmedo	m3 biogás	L biogás
1:01	0.1	0.0001	0.0001	0.1007	0.2007	0.0080	8.0282
1:02	0.1	0.0001	0.0002	0.2014	0.3014	0.0120	12.0564
1:03	0.1	0.0001	0.0003	0.3021	0.4021	0.0160	16.0846

Como se muestra en la figura 3, el reactor fue construido con un frasco tapa rosca de vidrio claro de 500mL (1), conectado por medio de una manguera a una probeta completamente sellada (3) y esta a su vez a un vaso precipitado abierto a la atmosfera (2). La medición del volumen de gas generado se realiza por arrastre de agua en la probeta. Antes de realizar cualquier llenado, fue esencial sellar el montaje con silicona líquida industrial ya que hay que asegurar que no se presenten fugas. Fueron necesarias cuatro semanas para el diseño y montaje del prototipo inicial.

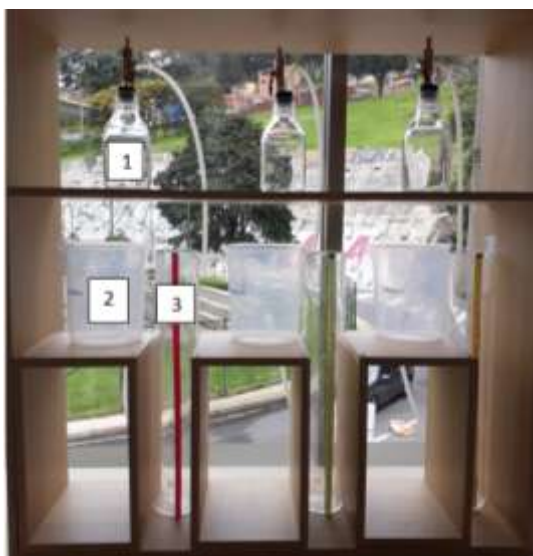


Figura 3: Diseño inicial primer montaje



Figura 4: Rectores experimento inicial

Después de construir los biodigestores a escala laboratorio, se realizó una purga con nitrógeno al 99.9% durante 3 minutos para eliminar el oxígeno que pudiera estar presente dentro del reactor y de esta manera garantizar que la reacción fuera completamente anaerobia, luego se llenaron cada uno de los reactores con las diluciones anteriormente propuestas.

Posteriormente, se modificó el montaje del experimento 1, con el fin de aumentar la temperatura de reacción a 40°C por lo que fue necesario utilizar un baño termostático. Para esto fueron utilizados los mismo reactores del experimento inicial, por lo tanto la misma biomasa y dilución.

Al observar los inconvenientes con la medición del volumen de agua arrastrada por consecuencia de la evaporación del agua contenida en los vasos de precipitado, se realizó un tercer montaje donde se utiliza un frasco lavador plástico de tapa abierta a la

atmosfera que disminuyera la pérdida de agua por evaporación. En este tercer experimento, se mantiene constante la temperatura y la dilución E:A con 40°C y 1:2 respectivamente, y se adiciona un inoculo de residuos de restaurante variando la cantidad de este en cada reactor. Los experimentos 2 y 3 también fueron realizados por triplicado, se les realizo la purga con N₂ y sellado con silicona líquida.

La figura 5 es una gráfica brindada por la universidad Hochschule Offenburg donde se muestra la generación de biogás con el paso del tiempo de diversos residuos de biomasa, incluidos los residuos del ganado.

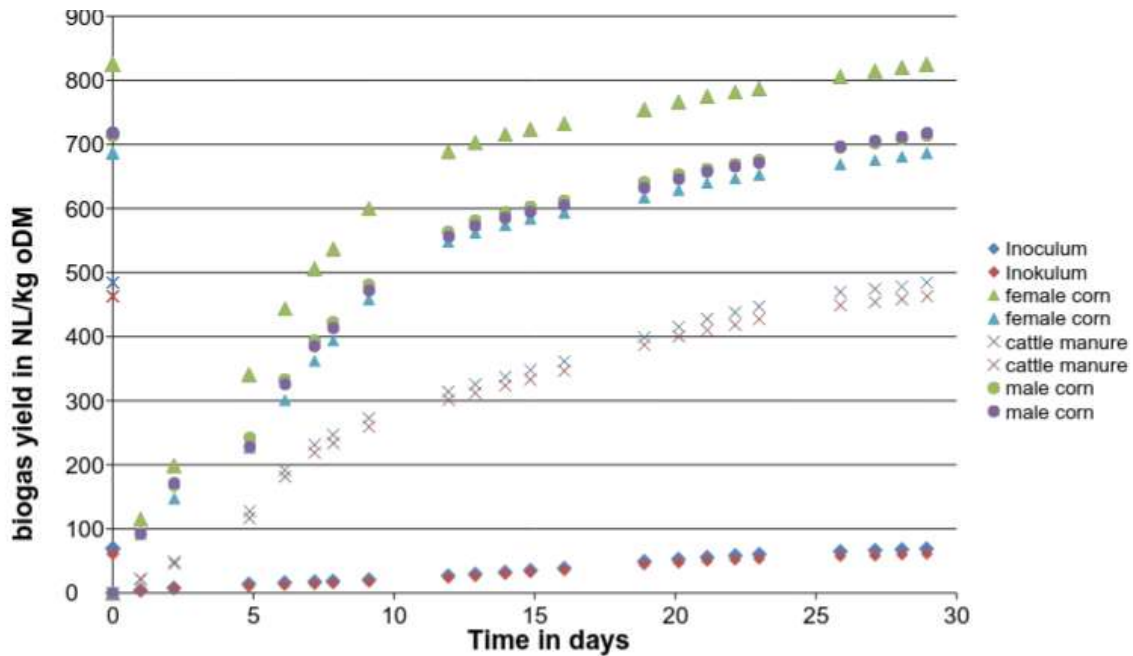


Figura 5: Valores esperados de la generación de biogás

Se emplearon diversas técnicas de análisis químico para conocer la calidad tanto del biogás generado como de los subproductos. Las pruebas de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) ayudan a analizar los grupos funcionales resultantes de las reacciones de cada una de las fases de la biodigestión. Para observar la calidad de biogás generado se utiliza un analizador de gases portátil modelo "Gasboard-3100P" el cual arroja valores de composición porcentual de compuestos fundamentales en el biogás como lo son metano y CO₂. Por último, con ayuda del laboratorio de suelos del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, se busca conocer si hay un aumento porcentual en los nutrientes del estiércol para que este pueda ser utilizado como abono realizando un análisis completo de materia orgánica.

5. Resultados y discusión

5.1. Experimento 1

Se realizó el montaje mostrado en la figura 3, en el cual los tres reactores se mantuvieron a temperatura ambiente de aproximadamente 17.8°C, la carga a cada uno fue con valores cercanos a los 100g de estiércol y se varió la cantidad de agua según se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Datos iniciales a la carga de los reactores experimento 1

REACTOR	g de estiércol	g de agua	pH
1	100.852	100.700	7.12
2	100.638	201.109	7.28
3	100.164	301.474	7.21

Al iniciar la experimentación, se empezó a mostrar una variación en la altura de las probetas (tabla 3), además de formación de burbujas en la parte superior de cada una, como lo muestra la figura 6.



Figura 6: Formación de burbujas en cada probeta

Tabla 3: Cambios de experimento 1

DÍA	ALTURA REACTOR 1 (cm)	ALTURA REACTOR 2 (cm)	ALTURA REACTOR 3 (cm)
0	11.5	12	12
1	11.5	12	12
2	11.5	12	12
3	11.8	12	12
7	12.4	12.3	12.5
10	12.4	12.5	12.5
15	12.5	12.8	12.8
18	12.6	12.9	12.9
21	12.8	13	13.1
23	12.9	13.2	13.3

Según los datos anteriores, se puede conocer el volumen de biogás generado ya que se sabe que el diámetro de las probetas es de 8cm y la altura de agua desplazada (h)

$$V = r^2 * h * \pi \quad (1)$$

$$V = (4cm)^2 * (12.9cm - 11.5cm) * 3.1416 = 70.37cm^2$$

Tabla 4: Valores de biogás generado en experimento 1

Reactor	Volumen de biogás generado (ml)
1	70.37
2	60.32
3	65.34

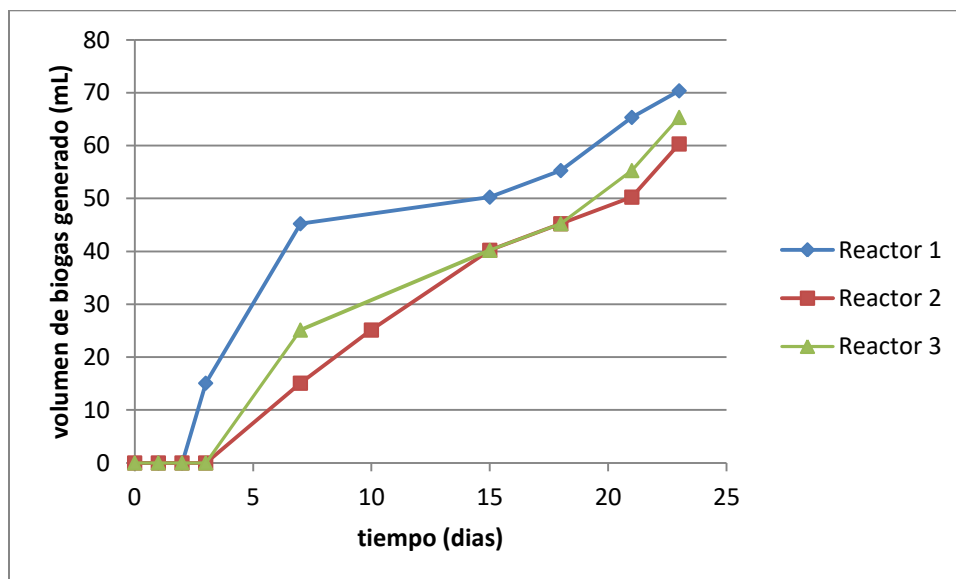


Figura 6: Grafica de la generación de metano en el experimento 1

Según los datos de la tabla 4, se dice que la dilución E:A con mejor generación de biogás tuvo fue la del reactor 1 (1:1) y los datos tuvieron una desviación estándar de 4.11 mL.

5.2. Experimento 2

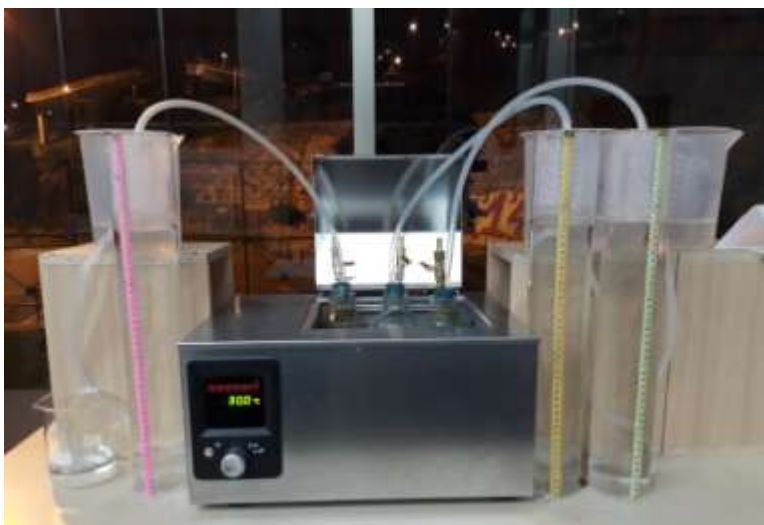


Figura 7: Montaje segundo experimento

En este segundo experimento, lo que se busca es aumentar la temperatura para así tener un mejor rendimiento de la reacción. Se utilizaron los mismos reactores que en el experimento 1, por lo tanto la misma biomasa y dilución de esta. Para aumentar la temperatura se utilizó un baño termostático con un set de 30°C en el cual se introdujeron los tres reactores como muestra la figura 8



Figura 8: Baño termostático usado en el segundo experimento

Nuevamente se tomó el cambio de altura en cada una de las probetas para calcular el nuevo volumen de biogás generado por medio de la ecuación 1.

Tabla 5: Cambios de experimento 2

DÍA	ALTURA REACTOR 1 (cm)	ALTURA REACTOR 2 (cm)	ALTURA REACTOR 3 (cm)
0	11.5	12	12
2	11.6	12.1	12.1
4	11.8	12.2	12.2
7	11.9	12.4	12.4
9	12	12.4	12.4
10	12	12.5	12.5
15	12.5	12.6	12.9

Tabla 6: Valores de biogás generado en experimento 2

Reactor	Volumen de biogás generado (ml)
1	50.27
2	30.16
3	45.24

Las figura 6 y 9, muestran las gráficas de volumen de biogás generado vs. tiempo de los experimentos 1 y 2 respectivamente. En ambas graficas se observa que el reactor 1, que presenta una dilución E:A de 1:1 tiene una mayor generación de metano al finalizar la reacción, por lo que se puede decir que esta dilución favorece el proceso de generación de biogás.

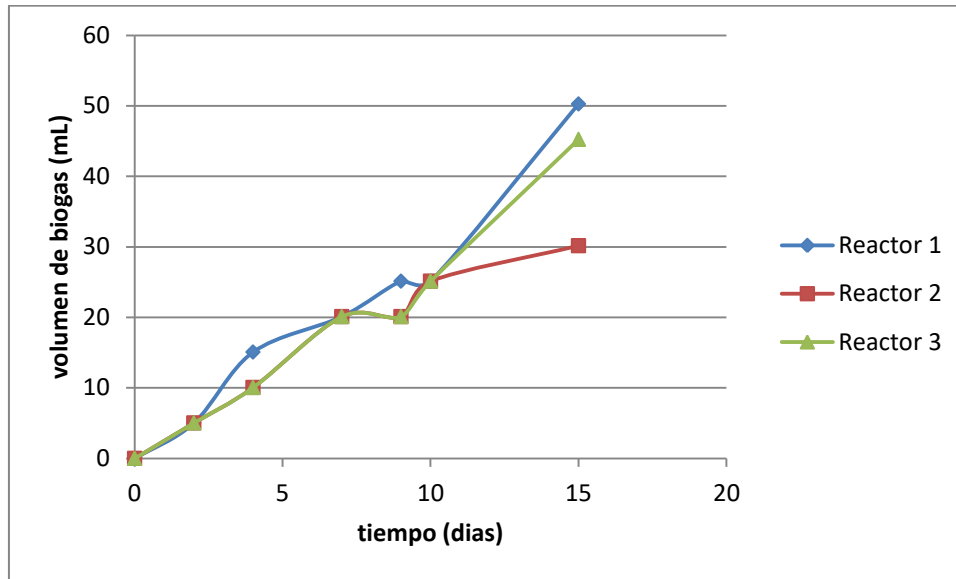


Figura 9: Grafica de la generación de metano en el experimento 2

Según los datos de la tabla 6, se dice que el reactor 1 con una dilución E:A de 1:1 genera la mayor cantidad de biogás durante los 23 días y los datos presentan una desviación estándar de 8.55 mL. Si comparamos estos datos con los obtenidos en el experimento 1, se puede decir que la producción de biogás fue menor a pesar de que se aumentó la temperatura, pero esto se debe a que en este experimento se evitó exponer el montaje a la luz directa del sol para evitar la evaporación de agua y así tener una mejor medición.

La idea de este proyecto es que el diseño del biodigestor se vaya modificando a medida que avanza la experimentación con el fin de corregir algunos errores, por ejemplo, la variación de temperatura que se realizó en el segundo experimento. Además, el vaso precipitado utilizado para almacenar el agua arrastrada de la probeta (figura 10) está completamente abierto a la atmosfera por lo que el agua que contiene se evapora rápidamente. Por principio básicos de mecánica de fluidos, se espera que la altura de agua del vaso y de la probeta sean iguales, ya que estos están conectados por medio de una manguera; pero a medida que el agua del vaso se evapora, el nivel de agua en la probeta también disminuye, lo que dificulta la medición de volumen de biogás generado. En el tercer experimento, se busca solucionar este problema de evaporación utilizando un recipiente con un orificio de menor tamaño.



Figura 10: Vaso precipitado utilizado en experimentos 1 y 2

5.3. Experimento 3

Como se mencionó anteriormente, en este montaje se busca disminuir la evaporación del agua utilizada para la medición de volumen de gas y además aumentar la temperatura a 40°C, ya que a dicha temperatura hay una mayor producción de metano en el biogás (Ed. Tecnológica de Costa Rica 1985). El uso de un frasco lavador permitirá que el sistema continúe abierto a la atmósfera con un pequeño orificio que evita la pérdida de agua por evaporación (figura 11).

Este sistema maneja una dilución constante en los tres reactores de 1:2 y para la alimentación se utilizó también estiércol de vaca adicionando un inóculo de residuos de comida de restaurante en diferentes cantidades a cada reactor. Los inóculos son muy utilizados para la producción de biogás ya que optimiza la producción de metano (Ferrer and Pérez 2010) por lo cual se quiso hacer uso de estos.

Tabla 7: Datos a la carga de los reactores experimento 3

REACTOR	g de estiércol	g de agua	g de inóculo	pH
1	100.019	200.381	50.424	7.11
2	100.270	201.603	100.138	7.25
3	100.469	200.007	150.167	7.17



Figura 11: Frasco lavador utilizado en experimento 3

Al igual que en los anteriores experimentos, se realizó medición del desplazamiento de agua para hallar el volumen de biogás generado por medio de la ecuación 1 obteniendo los datos que se muestran a continuación.

Tabla 8: Cambios de experimento 3

DÍA	ALTURA REACTOR 1 (cm)	ALTURA REACTOR 2 (cm)	ALTURA REACTOR 3 (cm)
0	12	13	12
5	12	13.1	12
8	12	13.2	12.1
11	12.1	13.2	12.1
12	12.1	13	12.1

Actualmente, se siguen tomando mediciones periódicamente para ver los avances de la reacción y los resultados serán mostrados en el proyecto realizado por la estudiante Valentina Cardozo, quien continuará con la investigación. Actualmente se observa que el reactor 2 al que se le adicionó igual cantidad de inoculo que de biomasa, presenta una mejor generación de biogás en comparación con los otros dos

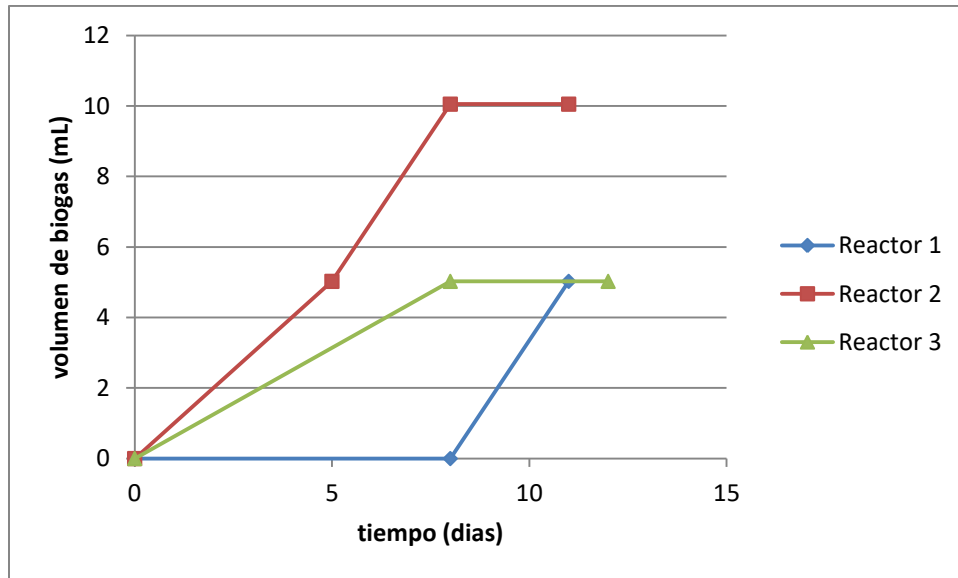


Figura 12: Grafica de la generación de metano en el experimento 3

5.4. Análisis del biogás generado

Se tomaron muestras de los bio-reactores para ser analizadas en el analizador de gases portátil modelo "Gasboard-3100P" (figura 13) el cual es accionado por una batería de iones de Li, obteniendo los datos plasmados en la tabla 9 se muestra que el reactor 1 del segundo experimento refleja un mayor porcentaje de metano.



Figura 13: Analizador de gases

Tabla 9: Composición del gas en el experimento 2

COMPUESTO	COMPOSICIÓN (%W/W) REACTOR 1	COMPOSICIÓN (%W/W) REACTOR 2	COMPOSICIÓN (%W/W) REACTOR 3
CO	0.01	0.00	0.00
CH ₄	0.23	0.03	0.00
H ₂	0.00	0.00	0.00
CO ₂	0.04	0.06	0.09
O ₂	20.88	20.81	20.84

Según los datos arrojados por el analizador de gases, se dice puede decir que se obtuvo un biogás de mala calidad por su bajo contenido de metano además se muestra la presencia de oxígeno, ya que no se controló la ausencia de aire al momento de tomar las muestras. Además, para un mejor funcionamiento del analizador de gases se debe tener un flujo continuo de biogás durante 160 segundos por lo que se recomienda tomar la lectura directamente del biodigestor.

5.5. Análisis del abono

Además de biogás, durante el proceso de fermentación realizado en el biodigestor se obtienen otros subproductos como por ejemplo abonos. Para que dichos productos puedan ser utilizados como abono, se requiere que la materia resultante tenga mayor cantidad de nutrientes que la materia prima y así tener un mayor aprovechamiento (Camps 2008), por lo que se busca realizar un análisis detallado de esta.

Terminado el tiempo de reacción, se procedió a recolectar el biogás generado para analizarlo y así poder abrir el sistema. Se pesó la biomasa contenida en cada uno de los reactores (tabla 10) la cual fue puesta a secar en un horno a 70°C, temperatura a la cual se garantiza no habrá pérdida de nutrientes y sí de gérmenes y malos olores, pero sí eliminación del agua (Garavito 1998).

Tabla 10: Datos a la descarga de los reactores experimentos 1 y 2

REACTOR	g de biomasa húmeda	pH
1	202.358	7.83
2	271.346	7.62
3	396.401	7.56

Tabla 11: Porcentaje de nutrientes antes y después de la muestra

NUTRIENTE	% MUESTRA INICIAL (base seca)	% MUESTRA FINAL (base seca)	INCREMENTO PORCENTUAL
nitrógeno	1.60	1.60	0
fosforo	0.28	0.17	-39.29
potasio	0.53	0.70	32.07
calcio	0.89	0.96	7.87
magnesio	0.57	0.49	-14.04
azufre	0.27	0.26	-3.70
sodio	0.019	0.039	105.26

Tabla 12: Contenido de N, P, K en el compost (FAO 2013).

Nutriente	% en compost
nitrógeno	0.3 – 1.5
fosforo	0.1 – 1.0
potasio	0.3 – 1.0

Según la tabla 11 donde se muestran la caracterización del EV, antes y después de la biodigestión, se observa que hay tanto pérdida como incremento de algunos nutrientes. Por ejemplo, hay un incremento del 32.07% de potasio después de la biodigestión, el cual favorece el crecimiento de plantas con raíces y tallos más fuertes, además una mayor resistencia a plagas y enfermedades (FAO 2013). Además el porcentaje de N, P y K se encuentra dentro de los rangos dado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el Manual del compostaje del agricultor. Según lo anterior, se puede decir que después de la biodigestión la biomasa resultante es atractiva para ser utilizada como abono.

5.5.1. Espectrometría infrarroja (FTIR)

Se realizaron pruebas de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) tanto a la muestra inicial como a cada una de las soluciones resultantes de abono en los reactores posteriores a la biodigestión, donde se busca conocer los grupos funcionales según la longitud de onda arrojada.

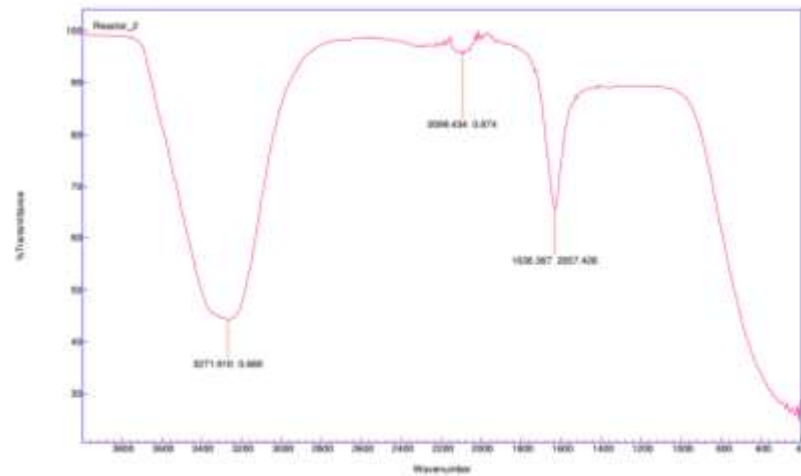
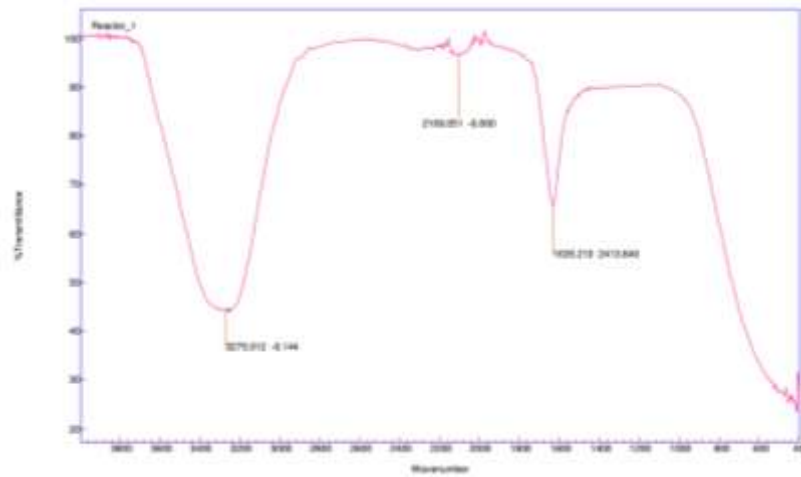
En la figura 14 se puede observar el espectro que da la muestra inicial del estiércol con el cual fueron alimentados los reactores, la cual arroja picos muy diferentes a los espectros de las muestras después de la reacción. Los picos con longitudes de onda de 2900cm^{-1} reflejan la presencia amidas, las cuales por medio de la hidrolisis pasaron a formar grupos carboxilo y aminos, reflejados en la figura 15. La curva observada a 3300 cm^{-1} muestra el grupo $-\text{OH}$ ya que la muestra presenta un nivel alto de humedad. El espectro reflejado en 1635 cm^{-1} hace referencia a polisacáridos en la muestra (Wang et al. 2013).



Figura 14: Gráficas FTIR de la muestra inicial

Como se muestra en la figura 14, los espectros en cada una de las muestras arrojan longitudes de onda similares. Con vibraciones entre 3100 y 3700 cm^{-1} se muestra

la presencia del grupo $-OH$ que pueden ser tanto del agua como de alcoholes (El Fels et al. 2014). La flexión alrededor de 2000cm^{-1} arroja la presencia de ácidos carboxílicos los cuales son resultado de la hidrólisis producida en una de las fases de generación de metano (Ed. Tecnológica de Costa Rica 1985). Alrededor de 1600cm^{-1} se muestran las vibraciones del grupo carbonilo correspondiente a las cetonas (Rojo 2000). Lo anterior, muestra un resultado favorable para la biodigestión ya que por los grupos funcionales se garantiza la hidrólisis realizada durante el proceso de biodigestión.



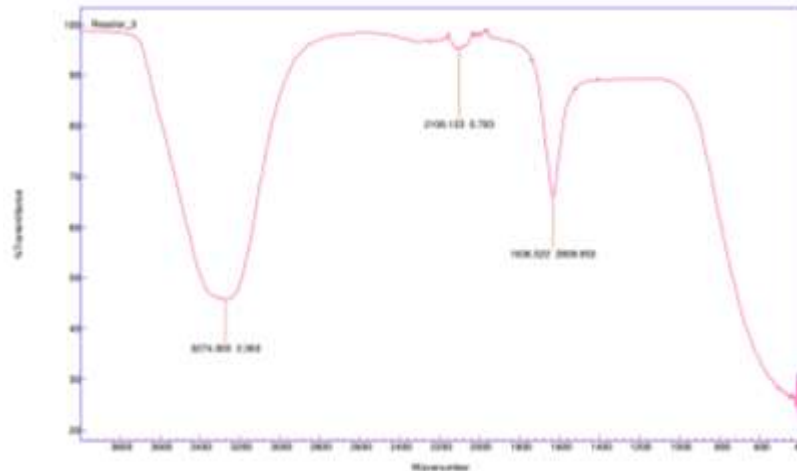


Figura 15: Gráficas FTIR de las muestras posteriores a la biodigestión en los reactores 1 (arriba), 2 (medio) y 3 (abajo).

6. Conclusiones

Se diseñó y construyó un sistema de biodigestión a escala laboratorio el cual permite analizar el comportamiento de diversos residuos de biomasa, en este caso fue utilizado el estiércol de vaca. Durante el diseño se buscó la manera de controlar diversos factores como lo son la temperatura, dilución E:A y la medición del volumen de biogás generado. Además, se buscó corregir errores de diseño como la exposición del agua de medición de volumen de gas generado a la evaporación y el aumento de la temperatura de reacción.

La biomasa obtenida a partir de la biodigestión muestra aumento en alguno de sus nutrientes como el potasio, calcio y sodio los cuales son vitales en la formación de las plantas, por lo que puede decirse que el subproducto es atractivo para ser utilizado como abono.

En los experimentos 1 y 2, se observa que según la medición de arrastre de agua el reactor 1, en ambos casos, presenta una mayor generación de metano en el tiempo de reacción. Por medio del análisis FTIR a las muestras antes y después de la bioreacción, se observan grupos funcionales típicos resultantes de las fases de la biodigestión. En el análisis del gas generado, se observa presencia de oxígeno por inconvenientes en el sistema de almacenamiento que serán corregidos en futuros diseños. Lo anterior causó una dilución en la composición de metano y CO_2 .

7. Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda el análisis y control otros parámetros durante la reacción como lo son la agitación, el posible aumento de la temperatura para optimizar el proceso y la variación de la materia orgánica. De igual forma, avanzar en el diseño para poder llegar a construir un sistema sofisticado de biodigestión como el que se muestra en la figura 15 donde existen sensores de lectura para el arrastre de agua, agitación automática en cada reactor y medición automática de la generación de biogás. Además, se recomienda mejorar el sistema de recolección de biogás utilizando bolsas de muestreo especializadas para gases con el fin de facilitar el análisis de composición.



Figura 16: Biodigestor Universidad de Ciencias Aplicadas Hochschule Offenburg

8. Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

Las directivas del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano por el apoyo durante la realización de este proyecto ofreciendo espacios agradables de trabajo como lo es el Centro de Investigación en Procesos de Ingeniería (CIPI). De igual manera, a los monitores que trabajan allí y siempre estuvieron dispuestos a ayudarme con el préstamo de equipos y materiales.

A la Universidad de Ciencias Aplicadas Hochschule Offenburg por apoyar este proyecto, brindando material base para el diseño y elaboración del sistema de biodigestión. Además, al Dr.-Ing Carlos Andrés Forero, quien además de ser el intermediario para que fuera posible realizar el convenio, es el director de este trabajo de grado y siempre estuvo atento a solucionar cualquier inquietud o problema que se haya presentado durante el tiempo de realización de la misma.

A los miembros del grupo de investigación Energía, Ambiente y Desarrollo (EADE) de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, ya que ha sido un espacio donde he podido ampliar mis conocimientos sobre energías limpias y además, enseñarles un poco sobre lo aprendido durante la realización de este proyecto. También a mis compañeros de universidad por darme aliento en los momentos más difíciles.

A Valentina Cardozo, por interesarse en continuar con este proyecto para así lograr que nuestra universidad tenga un buen sistema de biodigestión, siendo pionera en la investigación de energías renovables.

Por ultimo pero no menos importante, quiero agradecer a mi familia por ser mi ejemplo y motivación a hacer las cosas bien y no tomar el camino fácil.

9. Bibliografía

Alvaréz, Estrella. 2014. "Material de Clase Tecnología Medioambiental: Tratamiento de Residuos." Vigo, España.

Camps, Manuel. 2008. *Los Biocombustibles*. segunda ed.

- Ed. Tecnológica de Costa Rica. 1985. *Diseño Y Construcción de Biodigestores*.
- FAO. 2013. *Manual de Compostaje Del Agricultor, Experiencias En América Latina*. Retrieved (<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>).
- El Fels, Loubna, Mohamed Zamama, Abdelghani El Asli, and Mohamed Hafidi. 2014. "Assessment of Biotransformation of Organic Matter during Co-Composting of Sewage Sludge-Lignocelulosic Waste by Chemical, FTIR Analyses, and Phytotoxicity Tests." *International Biodeterioration & Biodegradation* 87:128–37. Retrieved May 21, 2017 (<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.utadeo.edu.co:2048/science/article/pii/S0964830513004204>).
- Ferrer, Yoandy and Heidy Pérez. 2010. "Los Microorganismos En La Digestión Anaerobia Y La Producción de Biogás. Consideraciones En La Elección Del Inóculo Para El Mejoramiento de La Calidad Y El Rendimiento." *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar* 43:9–10.
- Garavito, Fabio. 1998. "El Abono Orgánico." 1. Retrieved (<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-829584>).
- Gonzales, Carolina. 2014. "Colombia Apuesta Por Los Biodigestores Para Generar Biogás En Las Áreas Rurales." 1. Retrieved (<https://twenergy.com/co/a/colombia-apuesta-por-los-biodigestores-para-generar-biogas-en-las-areas-rurales-1165>).
- Khairuddin, Nuruljannah, Latifah Abd Manaf, Mohd Ali Hassan, Normala Halimoon, and Wan Azlina Wan Ab Karim Ghani. 2016. "High Solid Anaerobic Co-Digestion of Household Organic Waste with Cow Manure for Mass and Energy Recovery." *Polish Journal of Environmental Studies* 25(4):1549–54.
- Magaña, J.Luis, Ernestina Torres, Martín T. Martínez, Carmen Sandoval, and Rosalia Hernández. 2006. "Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras." *Acta Universitaria* 16(2):27–37. Retrieved (<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41616204>).
- Rojo, Francisco. 2000. "Tablas de Espectroscopía Infrarroja." *Facultad de Química - Departamento de Programas Audiovisuales* 14. Retrieved (http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IRTablas_33080.pdf).
- Varnero, Maria Teresa. 2011. "Manual de Biogás." 119. Retrieved (<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>).
- Wang, Ke et al. 2013. "Spectral Study of Dissolved Organic Matter in Biosolid during the Composting Process Using Inorganic Bulking Agent: UV-vis, GPC, FTIR and EEM." *International Biodeterioration & Biodegradation* 85:617–23. Retrieved May 21, 2017 (<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.utadeo.edu.co:2048/science/article/pii/S0964830513001303>).