



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS Y  
APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**TESIS**

**“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE  
OPERACIÓN DE UN BIODIGESTOR  
RÍGIDO MODELO DM1”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN MATERIALES Y  
SISTEMAS ENERGÉTICOS  
RENOVABLES**

**PRESENTA  
LAURA VELEZ LANDA**

**DIRECTOR  
DR. JOEL MOREIRA ACOSTA**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas**

**Marzo de 2017**



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA ACADÉMICA  
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
22 de febrero de 2017  
Oficio No. DIP-138/17

**C. Laura Velez Landa**  
**Candidata al Grado de Maestra en**  
**Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**  
**Presente.**

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la opinión favorable de la Comisión Revisora que analizó su trabajo terminal denominado **“Evaluación de los parámetros de operación de un biodigestor rígido modelo DM1”** y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión** del documento mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que usted sustentará para obtener el Grado de Maestra en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables. Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

**Atentamente**

**“Por la Cultura de mi Raza”**

**Dra. María Adelina Schlie Guzmán**

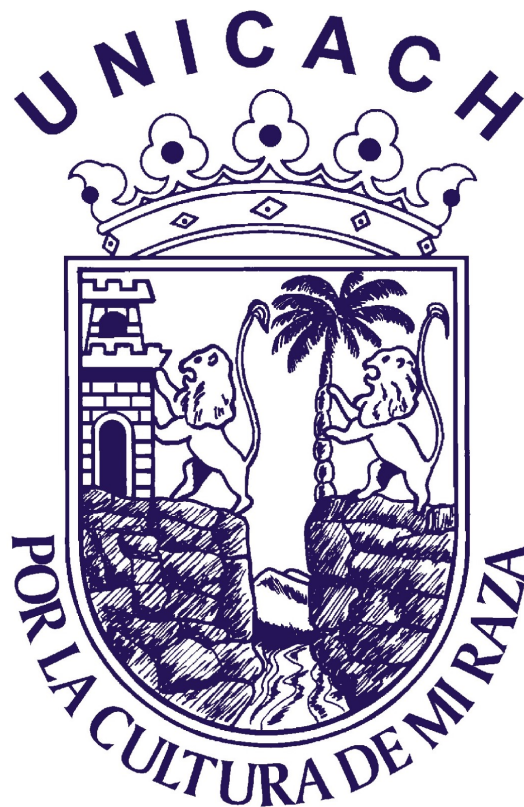
**Directora.**



DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

C.c.p. Expediente

Libramiento Norte Poniente 1150 C.P. 29039  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México  
Tel: 01 (961) 61 70440 ext. 4360



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ENERGÍAS  
RENOVABLES

TESIS:

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE  
OPERACIÓN DE UN BIODIGESTOR RÍGIDO  
MODELO DM1**

Presenta:

LAURA VELEZ LANDA

Director de tesis:

Dr. JOEL MOREIRA ACOSTA

## DEDICATORIA

*A Dios y a la Virgen por haberme permitido vivir esta grandiosa experiencia,  
A mis padres Estela Landa Hernández y Efrén Velez Iglesias porque siempre han creído en mí,  
A mis hermanos Julieta, Margarita, Rosalío, Paula y Armando que en todo momento me han  
brindado sus palabras de aliento,  
A mi novio Oscar Manuel Martínez Cielo quien me apoyó incondicionalmente en los  
momentos más difíciles y me alentó a continuar cuando sentía que no podía más,  
Al Dr. Joel Moreira Acosta por su ejemplo de humildad y perseverancia,  
A mis sobrinitos Aleidy, José, Ángel, Kevin, Diego, Santiago, Lionel, Ronaldo, Francisco y  
Jimena por convertirse en mi motivo para seguir con mis estudios,  
A mi abuelita Agustina, mi abuelito Nico †, mi cuñada Caty, mis amigos Fidel, Rosi, Edson,  
Vere, Armando, Natalia, Nely y Amalia, que siempre estuvieron a mi lado.*

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por concederme un lugar para seguir preparándome académicamente.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER) y a todo el cuerpo académico por darme la oportunidad de ser parte de la MMySER y por transmitir sus valiosos conocimientos los cuales me han ayudado a crecer profesional y personalmente.

Al CONACYT por el apoyo económico para el desarrollo de esta maestría.

Al Dr. Francisco Pola Albores, Dr. Roilán Iglesias Díaz y Dr. Joel Moreira Acosta miembros de mi comité tutorial por su tiempo, dedicación y sugerencias para hacer de éste un buen trabajo.

A mi madre por su entrega y sacrificio, por su ejemplo de mujer luchadora, por su apoyo incondicional, por enseñarme a enfrentar los problemas, por hacer de mí una mejor persona y por ser mi motivo para salir adelante.

A mi padre por su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

Al Ing. Oscar M. Martínez Cielo por el amor que me ha brindado, por el apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto y por enseñarme a enfrentar los retos.

Al Dr. Joel Moreira por compartir sus valiosos conocimientos, por sus sugerencias, colaboración, asesoría y sobre todo por su amistad.

Al Dr. Neín Farrera y al Dr. Pascual López por su apoyo y sugerencias.

Al Dr. Francisco Pola quien me apoyó con la gestión y compra de reactivos.

Al Dr. Joel Pantoja quien tuvo la amabilidad de facilitar el transporte cuantas veces fueron necesarias.

Al Dr. Jorge Conde por su apoyo en las cuestiones electrónicas.

Al Ing. Fidel Antúnez por su apoyo en todo momento, por su ejemplo de nunca dejarse vencer a pesar de las dificultades y sobre todo por su amistad.

Al Arq. Efraín por su colaboración en el transporte y recolección de materia orgánica.

Al Ing. Mario Alvarado por su paciencia y apoyo en la preparación de las disoluciones para la DQO.

A la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la UNACH, en especial al Ing. Eray Hernández.  
Al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNICACH, en especial a la Ing. Magaly González.  
Al laboratorio de calidad del agua de la UNACH, en especial a la Dra. Daisy Escobar.  
A los estudiantes de la Licenciatura en Energías Renovables de la UNICACH que estuvieron apoyando.

# Índice general

<b>Lista de figuras</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XI</b>
Resumen . . . . .	XII
Introducción . . . . .	XVI
Problemática . . . . .	XVIII
Objetivos . . . . .	XIX
Justificación . . . . .	XX
<b>1. Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Sistemas de biodigestión: evolución y desarrollo . . . . .	2
1.3. Biodigestores rígidos modelo DM1 . . . . .	4
1.4. Evaluación de diferentes tipos de biodigestores . . . . .	6
1.5. Producción de biogás a nivel laboratorio . . . . .	10
1.6. Conclusiones . . . . .	14
<b>2. Fundamentos teóricos</b>	<b>15</b>
2.1. Introducción . . . . .	15
2.2. Energías renovables: conceptos generales . . . . .	16
2.3. Bioenergía . . . . .	16
2.3.1. Biomasa . . . . .	16
2.3.2. Procesos de conversión de la biomasa en energía útil . . . . .	18
2.3.2.1. Conversión termoquímica . . . . .	18
2.3.2.2. Conversión fisicoquímica . . . . .	19
2.3.2.3. Conversión bioquímica . . . . .	20
2.3.3. Digestión anaerobia . . . . .	20

2.4. Biogás . . . . .	23
2.5. Sistema de biodigestión anaerobia . . . . .	24
2.6. Tipos de biodigestores . . . . .	26
2.7. Parámetros que influyen en la eficiencia de la producción de biogás . . . . .	31
2.7.1. Tipo de materia orgánica . . . . .	32
2.7.2. Temperatura . . . . .	32
2.7.3. Agitación . . . . .	33
2.7.4. Acidez (pH) . . . . .	33
2.7.5. Tamaño de partícula . . . . .	34
2.7.6. Velocidad de carga orgánica . . . . .	34
2.7.7. Tiempo de retención hidráulica (TRH) . . . . .	34
2.7.8. Contenido de sólidos totales . . . . .	34
2.7.9. Configuración del reactor . . . . .	35
2.7.10. Inhibición y toxicidad . . . . .	35
2.7.11. Relación carbono/nitrógeno (C:N) . . . . .	35
2.7.12. Ácidos grasos volátiles (AGV) . . . . .	36
2.7.13. Relación de alcalinidad (Análisis FOS/TAC) . . . . .	36
2.7.14. Presión dentro del biodigestor . . . . .	36
2.8. Conclusiones . . . . .	37
<b>3. Metodología</b>	<b>38</b>
3.1. Introducción . . . . .	38
3.2. Verificación y puesta a punto del sistema de biodigestión anaerobia . . . . .	38
3.3. Llenado del biodigestor . . . . .	40
3.4. Evaluación de los parámetros operacionales del biodigestor . . . . .	41
3.4.1. Determinación de sólidos . . . . .	41
3.4.2. Medición de la demanda química de oxígeno (DQO) . . . . .	44
3.4.3. Método de desplazamiento de agua para la cuantificación del volumen de biogás . . . . .	46
3.4.4. Monitoreo de la composición del biogás . . . . .	47
3.4.5. Monitoreo de la temperatura . . . . .	48
3.4.6. Monitoreo de la presión . . . . .	49
3.4.7. Monitoreo del pH . . . . .	50



3.4.8. Método de valoración para la determinación de ácidos grasos volátiles (AGV) . . . . .	51
3.4.9. Relación de alcalinidad (Análisis FOS/TAC) . . . . .	52
3.4.10. Tiempo de retención hidráulica (TRH) . . . . .	53
3.5. Recargas posteriores de sustrato . . . . .	54
3.6. Conclusiones . . . . .	54
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>55</b>
4.1. Introducción . . . . .	55
4.2. Condiciones necesarias para realizar el experimento . . . . .	56
4.2.1. Esquema general del sistema de biodigestión anaerobia . . . . .	56
4.2.2. Rehabilitación de los elementos que componen el sistema de biodigestión	58
4.2.2.1. Biodigestor o reactor . . . . .	58
4.2.2.2. Filtro de remoción de H <sub>2</sub> S . . . . .	59
4.2.2.3. Subsistema de almacenamiento de biogás . . . . .	60
4.2.3. Elementos para la evaluación de los parámetros operacionales del biodi- gestor . . . . .	61
4.2.3.1. Cuantificador de biogás: diseño, construcción e instalación . . . . .	61
4.2.3.2. Termopares, pH-metro y manómetro . . . . .	62
4.3. Evaluación de los parámetros operacionales . . . . .	63
4.3.1. Características nutrimentales del estiércol bovino . . . . .	63
4.3.2. Producción de biogás . . . . .	65
4.3.3. Composición del biogás . . . . .	67
4.3.4. Comportamiento de la temperatura . . . . .	68
4.3.5. Comportamiento de la presión . . . . .	71
4.3.6. Comportamiento del pH . . . . .	72
4.3.7. Comportamiento de los ácidos grasos volátiles (AGV) . . . . .	73
4.3.8. Comportamiento de la alcalinidad . . . . .	74
4.3.9. Evaluación del filtro de remoción de H <sub>2</sub> S . . . . .	76
4.3.10. Influencia de la agitación en la temperatura interna . . . . .	77
4.3.11. Demanda química de oxígeno (DQO) . . . . .	78
4.3.12. Bioabono . . . . .	79

<b>5. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>81</b>
5.1. Recomendaciones . . . . .	82
5.2. Trabajos futuros . . . . .	83
<b>A. Inspección del sistema de biodigestión</b>	<b>84</b>
<b>B. Rediseño, construcción e instalación de biodigestor</b>	<b>87</b>
<b>C. Agitador</b>	<b>91</b>
<b>D. Construcción del cuantificador</b>	<b>92</b>
<b>E. Calibración del pH-metro marca Bante 920</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>98</b>

# Índice de figuras

1.1. Biodigestores rígidos modelos DM1, DM2 y DM3. . . . .	4
1.2. Centro de Biodigestores. . . . .	4
1.3. Biodigestores rígidos modelo DM1 instalados en diferentes comunidades del estado de Chiapas. . . . .	5
2.1. Proceso de fotosíntesis . . . . .	17
2.2. Fuentes de biomasa. . . . .	17
2.3. Proceso de transformación de la energía química almacenada en la materia orgánica en biogás y bioabono. . . . .	23
2.4. Esquema de biodigestor rígido modelo DM1. . . . .	27
2.5. Reactor de mezcla completa sin recirculación (1) y con recirculación (2). . . . .	28
2.6. Reactor UASB. . . . .	29
2.7. Reactor de lecho fluidizado. . . . .	30
2.8. Filtro anaerobio. . . . .	30
3.1. Equipos de medición para determinación de sólidos. . . . .	44
3.2. Equipos de medición para DQO. . . . .	45
3.3. Esquema de cuantificador de biogás. . . . .	47
3.4. Analizador de gases . . . . .	48
3.5. Instrumentos de medición para monitorear la temperatura. . . . .	49
3.6. Manómetro. . . . .	49
3.7. Medidor para pH . . . . .	50
3.8. Materiales para el método de valoración . . . . .	52
4.1. Esquema general del sistema de biodigestión anaerobia. . . . .	56
4.2. Proceso de tratamiento de virutas de hierro . . . . .	60
4.3. Proceso de secado y llenado. . . . .	60
4.4. Bolsa de geomembrana llena de aire. . . . .	61

4.5. Cuantificador de biogás. . . . .	62
4.6. Termopares. . . . .	63
4.7. Muestras de estiércol. . . . .	64
4.8. Gráfica de la producción y composición de biogás. . . . .	66
4.9. Gráfica de la producción de biogás, metano y dióxido de carbono. . . . .	67
4.10. Gráfica de la composición del biogás y presión durante el proceso de digestión anaerobia. . . . .	68
4.11. Gráfica de comportamiento de la temperatura interna, del suelo y del ambiente durante 24 horas. . . . .	69
4.12. Gráfica del comportamiento de la temperatura interna vs producción de biogás durante 24 horas. . . . .	70
4.13. Gráfica del comportamiento de la presión durante el proceso de producción de biogás. . . . .	71
4.14. Gráfica de comportamiento del pH durante la digestión anaerobia. . . . .	73
4.15. Gráfica del comportamiento de los AGV a lo largo del tiempo. . . . .	74
4.16. Gráfica del comportamiento de la concentración de $\text{CaCO}_3$ . . . . .	75
4.17. Gráfica del comportamiento de la relación de alcalinidad del sustrato. . . . .	76
4.18. Gráfica de la concentración de $\text{H}_2\text{S}$ en el biogás antes y después de pasar por el filtro y su porcentaje de remoción. . . . .	77
4.19. Gráfica del comportamiento de la temperatura interna durante 10 minutos: (A) sin agitación y (B) con agitación. . . . .	78
4.20. Curva de calibración. . . . .	78
4.21. Bioabono líquido. . . . .	80
A.1. Detección de fugas en el biodigestor. . . . .	84
A.2. Tubería que transporta el biogás. . . . .	85
A.3. Biodigestor . . . . .	85
A.4. Reparación de tubería . . . . .	86
B.1. Diseño de biodigestor. . . . .	87
B.2. Realización de orificios. . . . .	88
B.3. Acoplamiento de la tapa. . . . .	88
B.4. Construcción del sistema de agitación. . . . .	89
B.5. Realización del hueco que contendrá el biodigestor. . . . .	89
B.6. Construcción de base para el biodigestor. . . . .	89

B.7. Instalación del sistema de biodigestión. . . . .	90
C.1. Agitador. . . . .	91
D.1. Tabla de material. . . . .	92
D.2. Corte de tubo a 1 m y 50 cm. . . . .	93
D.3. Perforación de cople y tapa. . . . .	93
D.4. Marcado de puntos. . . . .	94
D.5. Colocación de abrazaderas hidrotoma. . . . .	94
D.6. Colocación de adaptadores macho. . . . .	94
D.7. Ensamblado de accesorios. . . . .	95
D.8. Cuantificador construido al 80 %. . . . .	95
D.9. Colocación de válvulas. . . . .	95
D.10. Cuantificador de biogás: (A) instalado y (B) piezas que conforman el sistema. . .	96

# Índice de tablas

3.1. Características de la medición del biogás. . . . .	47
3.2. Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC. . . . .	53
4.1. Características nutrimentales del estiércol bovino. . . . .	63
4.2. Pesos de las muestras y determinación de ST y SVT. . . . .	65
4.3. Parámetros experimentales de la mezcla estiércol/agua. . . . .	65
4.4. Valores de pH y sus interpretaciones. . . . .	72
4.5. Valores de AGV y sus interpretaciones. . . . .	74
D.1. Herramienta utilizada. . . . .	93

# Resumen

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento operacional de un biodigestor rígido modelo DM1 utilizando como materia prima estiércol de ganado bovino, ya que este tipo de residuo es el de mayor producción en el estado de Chiapas, además de su fácil recolección.

Este tipo de desecho orgánico debido a sus propiedades nutrimentales de carbono y nitrógeno entre otros, es considerado para la producción de biogás y bioabono, el primero es un biocombustible que se utiliza como energía útil principalmente para la cocción de alimentos y el segundo como fertilizante orgánico. Se empleó información del último censo agropecuario del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para conocer la población de ganado en el estado de Chiapas.

Los objetivos de este trabajo fueron en primer lugar desarrollar las condiciones necesarias y adecuadas para realizar la evaluación del biodigestor y en segundo lugar conocer los parámetros operacionales en este tipo de dispositivos tales como la composición y producción de biogás, el tiempo de retención hidráulica (TRH), su eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de DQO, temperatura interna, las variaciones de pH, presión, concentración de ácidos grasos volátiles totales y alcalinidad.

Uno de los principales resultados obtenidos en este trabajo fue haber logrado la construcción de un nuevo dispositivo de bajo costo y alta eficiencia, como muestra la producción máxima de biogás de 599 litros en el día 31 con un promedio de 335 litros/día en un lapso de 35 días, en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 25 °C) el cual estuvo compuesto de 63 % de metano y 37 % de dióxido de carbono. Durante el proceso de digestión anaerobia el pH se mantuvo en 7.1 como promedio, la concentración de ácidos grasos volátiles totales fue de 2299.5 mg/L, la temperatura interna se mantuvo dentro del régimen mesofílico (28 °C) con una variación a lo largo del día de  $\pm 0.1$  °C/hora, lo que influyó favorablemente en la producción de

biogás, además este tipo de dispositivo soporta una presión máxima acumulativa de 0.8 PSIG sin sufrir daños en la estructura ni en la tubería.

Por otra parte el sistema de filtración permitió remover en promedio un 94.5% de ácido sulfhídrico contenido en el biogás. El sistema de agitación cumplió satisfactoriamente la función de homogenizar la temperatura y la población bacteriana. Con estos resultados se puede concluir que la producción de biogás obtenida es suficiente para 2-3 horas de cocción de alimentos o aplicaciones similares.



# Abstract

In this work the operational behavior of a rigid biodigester model DM1 was evaluated using bovine manure as raw material, since this type of residue is the one with the highest production in the state of Chiapas, besides its easy to collect.

This kind of organic waste due to its nutritional properties of carbon and nitrogen, among others, is considered for the production of biogas and biofertilizer, the first is a biofuel that is used as useful energy mainly for cooking and the second one as organic fertilizer. Information was used from the last agricultural census of the Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) to know the population of cattle in the state of Chiapas.

The objectives of this work were firstly to develop the necessary and adequate conditions to perform the evaluation of the biodigester and secondly to know the operational parameters in this type of devices such as the composition and production of biogas, hydraulic retention time (TRH), organic matter removal efficiency in terms of COD, internal temperature, changes in Hp, pressure, concentration of total volatile fatty acids and alkalinity.

One of the main results obtained, was the construction of a new device of low cost and high efficiency, getting maximum biogas production of 599 liters on day 31 with an average of 335 liters/day over a period of 35 days in normal conditions of pressure and temperature (1 atm and 25 °C), which was composed of 63% methane and 37% carbon dioxide. During the process of anaerobic digestion the Hp was maintained at 7.1 on average, the total volatile fatty acid concentration was 2299.5 mg/L, the internal temperature remained within the mesophilic regime (28 °C) with a variation throughout the day of  $\pm 0.1$  °C/hour, which had a favorable effect on the biogas production. Beside, this device supports a maximum cumulative pressure of 0.8 PSIG without damaging the structure or the pipe.

On the other hand, the filtration system allowed to remove on average of 94.5% sulfuric acid contained in the biogas. The agitation system satisfactorily fulfilled the function of homogenizing the temperature and the bacterial population. With these results it can be concluded that the biogas production obtained is enough for 2-3 hours of cooking or similar applications.

# Introducción

La energía es fundamental para el crecimiento económico y la sostenibilidad del medio ambiente. En la actualidad más del 80 % del consumo energético mundial proviene de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón entre otros), los cuales están provocando cambios significativos en nuestro ecosistema, además de que las reservas se están agotando. Por tal motivo se buscan nuevas fuentes de energía renovables como la hidráulica, solar, eólica, geotérmica y biomasa, que permitirán diversificar las fuentes de energía, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases con efecto invernadero.

Las energías renovables tienen una escasa participación dentro de la matriz energética de México, ya que la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables alcanzó en 2014 un total de 55,003 GWh, lo que equivale al 18 % del total generado. La energía hidroeléctrica aporta un 13 % (38,822 GWh), la eólica un 2 % (6,426 GWh), la geotérmica un 2 % (6,000 GWh), la fotovoltaica 0.03 % (85 GWh), bagazo 0.2 % (629 GWh) y el biogás 0.05 % (148 GWh) [3], a su vez la Ley General para el Cambio Climático se ha fijado el objetivo de generar el 35 % de sus necesidades energéticas a partir de fuentes renovables para el 2024 [4], con ello, las energías renovables toman un papel preponderante para alcanzar dicho cometido.

Contar con acceso a fuentes de energía renovable, factible, confiable y sostenible es esencial para mejorar la calidad de vida de millones de personas en todo el mundo y mantener el progreso en todos los ámbitos del desarrollo.

Sin embargo, nuestro país, cuenta con un índice de pobreza de 46.2 % que equivalen a 55.3 millones de pobres, de los cuales 11.4 millones (9.5 %) viven en pobreza extrema.

Es alarmante observar que en el estado de Chiapas 3,961,000 (72.2 %) habitantes viven en pobreza, de los cuales 1,654,000 (31.8 %) están sumergidos en pobreza extrema [17]. En algunos municipios, desde hace mucho tiempo y hasta hoy en día la agricultura y la ganadería (princi-

palmente vacas lecheras) son uno de los principales pilares de su economía.

La producción pecuaria dentro del sector primario que más destaca en el estado de Chiapas es el ganado bovino y porcino, con una existencia reportada en 2014 por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de 2,653,408 y 751,593 cabezas, respectivamente. Es probable que estas cifras a la fecha hayan variado, pero esa variación no debe ser significativa debido a que son actividades directamente relacionadas con su economía. En este sentido los desechos animales se constituyen en uno de los recursos de biomasa que se pueden emplear como materia prima para la producción de biocombustibles tales como el biogás.

La gran cantidad de estiércol producido diariamente por el sector pecuario, no tiene un tratamiento adecuado para obtener una mejora en su disposición final, esto implica tener malos olores, criaderos de moscas y un foco de infección perjudicial para toda la población, además de provocar la contaminación del suelo, agua y aire. Por esto la tecnología de biodigestión anaerobia es cada vez más aceptada como una alternativa de solución al problema de la contaminación y como energía útil para satisfacer las necesidades básicas.

Asimismo en este trabajo se pretende evaluar el comportamiento de un biodigestor rígido modelo DM1, en todo el proceso de producción de biogás, utilizando estiércol de ganado bovino como materia prima, esto con el fin de conocer la eficiencia de este sistema en función a sus parámetros operacionales principalmente para la cocción de alimentos, si es necesario mejorar algunos aspectos del diseño y brindar a los usuarios los conocimientos básicos en cuanto al funcionamiento, instalación y mantenimiento, para hacer más amena la apropiación de dicha tecnología en comunidades rurales y granjas. Además, con este sistema se puede contribuir a generar productos con valor agregado como el bioabono, que a su vez mejoraría la economía de las familias.

# Problemática

Existe una gran variedad de sistemas para la producción de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, entre ellos se encuentran los biodigestores rígidos modelo DM1 desarrollados por investigadores especialistas que actualmente se encuentran en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER), los cuales ya se han implementado en comunidades rurales y Ranchos del estado de Chiapas.

Sin embargo, no se cuenta con la información suficiente y necesaria del comportamiento del biodigestor rígido modelo DM1 durante el proceso de producción de biogás y bioabono desde el punto de vista técnico, lo que ha provocado que por parte de los usuarios exista cierta incertidumbre de su rendimiento para obtener biogás y además no se cuenta con el equipo e instrumentos de medición para realizar su evaluación. Por tal razón, es esencial desarrollar las condiciones adecuadas para llevar a cabo las evaluaciones requeridas para determinar el desempeño del biodigestor.

# Objetivos

## GENERAL

Evaluar el comportamiento operacional de un biodigestor rígido modelo DM1 durante el proceso de producción de biogás, con el fin de determinar su desempeño considerando estiércol bovino como materia prima.

## ESPECÍFICOS

- Desarrollar las condiciones necesarias para realizar la evaluación.
- Evaluar el desempeño del biodigestor alimentado con estiércol bovino.

# Justificación

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en conjunto con el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), realizaron un estudio de la situación actual de biodigestores instalados a nivel nacional, en el cual se encontró que los principales problemas subsecuentes a la instalación de biodigestores en México, es la falta de mantenimiento y el poco conocimiento operacional y técnico por parte de los usuarios, ocasionando con esto que el volumen de metano ( $\text{CH}_4$ ) sea menor al esperado, lo que conlleva a que los usuarios pierdan el interés por esta tecnología [2].

Por otra parte, el aprovechamiento del biogás impulsa de manera muy importante la reducción de emisiones de gases contaminantes, entre los que se encuentra el  $\text{CH}_4$ , constituyente principal del biogás, que contribuye como gas de efecto invernadero (GEI), ya que su potencial de calentamiento global es 23 veces mayor que el del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), además, se piensa que puede ser también responsable de la reducción de la capa de ozono en las zonas árticas [19].

Asímismo se estima que alrededor de 28 millones de habitantes mexicanos (6 millones de hogares) usan leña como principal fuente de energía. De esta población, 19 millones la utilizan como combustible único para cocinar y el resto la usa en combinación con gas LP. En algunas regiones el acceso a la leña es un problema, debido a su alto costo o a la gran cantidad de tiempo y esfuerzo requerido para conseguirla. Se ha encontrado que las familias gastan 15 o 20 % de sus ingresos en la compra de leña o hasta 2-3 horas-persona por día en recolectarla [49].

Con el uso de la tecnología del biogás producido en biodigestores, todos estos problemas serían mínimos, ya no gastarían tanta leña para la cocción de alimentos de lo que se reduciría tanto el tiempo y el dinero que destinan para este combustible como las enfermedades respiratorias ocasionadas por la sobreexposición al humo, además de reducir en gran medida la deforestación y además obtendrían el bioabono que se puede utilizar para los mismos cultivos

o para venderlo, ya que cuenta con contenido de nitrógeno, fósforo y potasio que son minerales de vital importancia para el crecimiento de las plantas.



# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1.1. Introducción

En este capítulo se presenta el estado del arte del biogás, de los primeros biodigestores desarrollados, además de las diferentes evaluaciones tanto del biodigestor rígido modelo DM1 como de otros tipos de biodigestores anaerobios.

La evaluación del comportamiento de biodigestores durante el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás es de gran importancia, debido que al monitorear parámetros tanto ambientales como operacionales, permite tener un amplio panorama de aspectos que influyen en él, ya que si no se tiene una evaluación constante, es muy complicado diagnosticar si un biodigestor está operando correctamente.

De acuerdo a Ferrer, et al. (2011) [29] la cuantificación de biogás y metano es necesaria para evaluar el desempeño de los sistemas, mejorar la producción de biogás y reducir los costos de capital.

En la literatura son pocos los estudios que evalúan el comportamiento de biodigestores anaerobios en el proceso de producción de biogás a pequeña escala para zonas rurales. La mayoría de las investigaciones sobre este proceso, son realizados a nivel laboratorio, es decir, en condiciones ideales para que la digestión anaerobia se lleve a cabo satisfactoriamente y con volúmenes de trabajo muy pequeños, ya que su enfoque principal está en estudiar por ejemplo el comportamiento de la comunidad bacteriana [65], temperaturas específicas, comportamiento del biodigestor con residuos orgánicos solos o en co-digestión, etc.

Se ha demostrado que en la producción de biogás influye el tipo y la concentración de desechos orgánicos, la temperatura interna, relación carbono/nitrógeno, pH, el tiempo de retención hidráulica (TRH), velocidad de la carga orgánica (OLR), entre otros. De esta manera, se ha investigado la producción de biogás a partir de diferentes tipos de materia orgánica como pastos marinos [8], mezcla de frutas y verduras [64], estiércol de vaca con cascara de maíz [6], estiércol de puerco [57], paja de trigo y residuos de cereales [74], cultivos silvestres y variedades de hierba cinta [56], estiércol de elefante, estiércol de caballo [61], residuos orgánicos provenientes de actividades colectivas (escuelas, condominios, etc.), estiércol de pollo en co-digestión con residuos de cereales [74], aguas residuales de fabricantes de conservas de mariscos con glicerol, desechos de cocina [38], etc.

## 1.2. Sistemas de biodigestión: evolución y desarrollo

El gas natural, cuyo componente principal es el metano ( $\text{CH}_4$ ), fue utilizado por pueblos chinos y persas hace miles de años como generador de calor; sin embargo tuvieron que pasar varios años para que se dieran cuenta que el metano no sólo se podía obtener de los combustibles fósiles, sino que también de forma espontánea de la naturaleza .

En 1776, el científico italiano Alessandro Volta descubrió que el gas obtenido de manera natural en los pantanos era inflamable [47]. Más tarde en 1821 la fórmula del gas metano fue descubierta por Amedeo Avogadro. En el año 1868 el biólogo inglés Antonio Bechamp definió las reacciones de formación del biogás como constituyentes de un proceso microbiológico.

Propoff, en 1875, descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias [11]. En 1859, la primera planta de digestión anaerobia fue construida en una colonia de leprosos, en Bombay, India. En 1895, los digestores anaerobios se extendieron a Inglaterra, cuando el biogás fue usado como combustible en las lámparas externas de las calles de Londres, y no fue hasta el año 1887 que el científico Hoppe-Seyler, pudo comprobar la formación de metano a partir de acetato, por su parte, Soehngen descubrió en 1906 la formación de metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono [47].

También el químico francés Pasteur en 1884, realizó investigaciones del biogás producido a partir de residuos animales. Unos de sus alumnos llamado Gayon fermentó  $1 \text{ m}^3$  de estiércol

de ganado a 35 °C obteniendo 100 litros de biogás. Este ensayo dio tan buenos resultados que Pasteur sugirió que se podría utilizar como combustible para calefacciones y alumbrado público. Se obtuvieron resultados tan positivos que incluso se pensó en aprovechar el estiércol de los caballos que en esa época servían como transporte público por las calles de París [7].

En el año 1906 se realizó la construcción de la primera planta de tratamiento de aguas residuales en Alemania, y en el 1920 se construyó una planta depuradora de aguas residuales anaeróbica con producción de biogás que se inyectó a la red pública de gas natural. Imhoff puso en práctica el primer biodigestor en Alemania.

El biodigestor tipo Taiwán (salchicha) fue diseñado por Pound en 1981. Durante los años de la segunda guerra mundial comienza la difusión de los biodigestores a nivel rural tanto en Europa como en China e India que se transforman en líderes de la materia [36]. Pero la difusión de estos dispositivos, se ve frenada por el uso de los combustibles fósiles debido a su bajo costo y por lo tanto de fácil acceso para todos, y en la década de los 70s a causa de la crisis energética se reinicia la investigación y desarrollo de biodigestores.

Actualmente Asia, Holanda, Austria, Alemania y Dinamarca son los lugares donde existen la mayoría de plantas de biogás. En nuestro país, México aún no es importante el número de biodigestores instalados, ya que en 2011 sólo existían 721 biodigestores, de los cuales 367 en operación y 354 en construcción [2]. De éstos, 563 biodigestores son financiados bajo el esquema del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), 154 con apoyo del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) y 4 biodigestores a través de la Iniciativa Metano a Mercados. La investigación continúa sobre el desarrollo de nuevos diseños de este tipo de dispositivos, con el fin de reducir costos tanto de fabricación como de instalación manteniendo una eficiencia alta, esto hace que el campo de investigación para el futuro sea cada vez más amplio.

Una de las experiencias más importantes en México es la de Bioenergía de Nuevo León, la cual es una planta de generación de energía eléctrica que emplea el biogás generado en el relleno sanitario del Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (SIME-PRODE) de Salinas Victoria, Nuevo León. Esta planta está compuesta de 7 motogeneradores de 1 MW cada uno.

### 1.3. Biodigestores rígidos modelo DM1

En el año 2006, en la Universidad Politécnica del Estado de Chiapas (UPChiapas), el cuerpo académico Energía y Sustentabilidad conformado por el Dr. Joseph Sebastian Pathiyamattom, Dr. Joel Moreira Acosta, Dr. Joel Pantoja Enríquez y el Dr. Guillermo Ibañez Duharte y alumnos de la licenciatura en Ingeniería en Energía diseñaron y desarrollaron los biodigestores DM (Figura 1.1) (los DM1 de cúpula fija, DM2 de cúpula móvil y los DM3 de geomembrana flexible), los cuales se instalaron por primera vez en el rancho Santa Malena en Villa Hidalgo municipio de Villa Flores, Chiapas [53].



Figura 1.1: Biodigestores rígidos modelos DM1, DM2 y DM3.

Más tarde, en el año 2010 continuaron con el desarrollo de los biodigestores DM1, pero ahora en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER) ubicado en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), realizando varias modificaciones a dicho modelo hasta llegar a la versión actual con capacidades de 1100 y 5000 litros y creando un Centro de Desarrollo y Evaluación de Biodigestores (Figura 1.2).



Figura 1.2: Centro de Biodigestores.

A lo largo de este tiempo, estos dispositivos han sido implementados en ranchos y comunidades rurales del Estado de Chiapas (Figura 1.3), como el Duraznal, municipio de San Cristóbal, Villa de las Rosas, Villa Hidalgo, municipio de Villaflores, Rancho el Bisturí, municipio de San Fernando, Ejido Nuevo Milenio, municipio de Copainalá, Ejido Pasoyate, municipio de Villa de Acala, Monte Horeb, municipio de Cintalapa, obteniendo una buena aceptación por los usuarios y con producciones de biogás suficientes para la cocción de alimentos [53], pero a pesar del gran éxito que han tenido, no se han hecho evaluaciones específicas del comportamiento tanto del sistema en general como del proceso de digestión anaerobia.



Figura 1.3: Biodigestores rígidos modelo DM1 instalados en diferentes comunidades del estado de Chiapas.

Uno de los estudios fue realizado por Villanueva, Juan A., et al, 2011 [35], en el cual se evaluó un biodigestor modelo DM1 con capacidad de 1100 L, realizaron dos cargas, una con 983.3 L de mezcla estiércol-agua con una concentración de 1:1, a una temperatura interna promedio de 31°C, en un tiempo de retención hidráulica de 29 días, manteniendo un pH de 6.96 en promedio, obteniendo una producción de biogás total de 884.05092 L y una producción de biogás de 1.2 L/kg de materia orgánica. En la caracterización del biogás se obtuvo un 74 % de metano.

La segunda carga fue de 884.97 L de mezcla estiércol-agua con una concentración de 1:1, a una temperatura interna promedio de 32.68°C, en un tiempo de retención hidráulica de 10 días, manteniendo un pH de 7.10 en promedio, obteniendo una producción de biogás total de 998.30 L, la rapidez en la producción de biogás y el mayor volumen obtenido fue porque se dejó un 10 % de inóculo de la carga anterior. El biogás fue cuantificado por el método de desplazamiento de agua.

Otra de las investigaciones fue realizada por Farrera, Neín (2011) [28], en la que se evaluó durante dos meses un biodigestor rígido DM1 con capacidad de 1100 L, éste fue instalado en Monte Horeb municipio de Cintalapa, se realizaron 4 cargas de 924 L, 883 L, 891 L y 878 L, obteniéndose un volumen total de 2054 L, lo que equivale a más de 8 horas de combustión de biogás.

La investigación más reciente fue realizada por Gómez, César (2014) [30], en la cual se realizaron cuatro cargas de estiércol bovino dos de 200 L y dos de 100 L, obteniendo en cada carga 3.5, 5, 3.5 y 3.5 m<sup>3</sup> de biogás respectivamente; con una relación estiércol/agua de 1:3 a una temperatura ambiente promedio de 28°C y se obtuvieron 0.0311 m<sup>3</sup> de biogás por cada kilogramo de estiércol introducido al biodigestor, no se mencionan mediciones de pH, presión ni temperatura interna.

Como se puede observar actualmente a pesar de contar con un Centro de Desarrollo y Evaluación de Biodigestores (Figura 1.2), no hay mucha bibliografía sobre estos dispositivos o la que hay es de evaluaciones muy generales de su comportamiento y poco explícita en cuanto a los rendimientos del sistema.

## **1.4. Evaluación de diferentes tipos de biodigestores**

En este apartado, se hace una recopilación de investigaciones previas las cuales han sido tomadas como base para el trabajo a desarrollar, se muestran evaluaciones que se han realizado de diferentes tipos de biodigestores, cada una de ellas con un enfoque diferente.

Osorio, Jairo, et al., (2007) [57] Evaluaron un sistema en serie de dos biodigestores en clima frío, uno de cúpula fija tipo GTZ y otro flexible tipo Taiwán. La materia prima que utilizó fue estiércol de puerco. El sistema se cargó 3 veces a la semana con un volumen de 480 litros de mezcla con una relación agua/estiércol de 3:1. Se encontró una producción de biogás con un rendimiento promedio de 70 m<sup>3</sup>/semana. El volumen de biogás se midió de manera directa dos veces por semana, la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST) y ácidos grasos volátiles (AGV) fueron medidos semanalmente durante cuatro meses, obteniendo resultados del 96,1 %, 95,1 % y 18 mg/L respectivamente, el pH se mantuvo cercano a 7 en la entrada y salida, el tiempo de retención fue de 45 días, la temperatura ambiente y la temperatura a la entrada del sistema se registraron diariamente, utilizando termopares conectados a un equipo de adquisición de datos obteniendo temperaturas promedio de 16 °C. Estos resultados son un indicativo de la alta eficiencia del sistema tanto en producción de biogás, como en remoción de carga contaminante. Por lo tanto se concluye que los porcentajes de remoción de la carga contaminante, se encuentran por encima de los valores encontrados en otros sistemas de flujo continuo.

Pedraza, G. et al., (2002) [59] Evaluaron dos tipos de materiales sintéticos para los biodigestores con el fin de analizar variables relacionadas con la operación y mantenimiento y su influencia en los parámetros de remoción. Compararon dos biodigestores de plástico polietileno de invernadero y dos biodigestores de geomembrana de PVC, con 2.6 m de longitud y 520 de volumen líquido. Se cargaron diariamente con 34.7 L de una mezcla (26 L de agua, 4.7 kg de estiércol y 4 L de orina), el tiempo de retención fue de 15 días. El estudio duró 6 meses considerándose los primeros 3 meses como período de arranque y el resto como período de estabilización con una temperatura ambiente de 18 °C. En la fase de arranque, la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) en el biodigestor de plástico de invernadero fue más estable y más alta (39.7 mg/L) que en el de PVC (33 mg/L), este parámetro fue analizado por medio del método de titulación simple, una vez por semana en horas de la mañana y sirvió para determinar la estabilidad del sistema después del arranque.

La producción de biogás en los dos tipos de biodigestores presentó un comportamiento muy similar en la fase de arranque (66.4 L/día en los biodigestores de geomembrana y 65.5 L/día para los biodigestores plásticos), aumentando en la fase de estabilización hasta 98 L/día. Las temperaturas internas fueron muy similares en los dos tipos de biodigestor, con un promedio de 23°C. El pH y la temperatura se midieron dos veces por semana durante 24 horas cada 4 horas y se pudo observar que fueron ligeramente más altos en el biodigestor plástico de invernadero que en el de geomembrana. Ambos tipos de biodigestores resultaron eficientes para la remoción de la materia orgánica con valores de 91 y 92 % para DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y 88 y 89 % para DQO (demanda química de oxígeno), respectivamente. Se estableció además que para temperaturas ambientales de 18 a 21°C como las de esta investigación es adecuado trabajar 15 días de tiempo de retención y una carga volumétrica diaria de 0.066 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de biodigestor, con estos parámetros se puede esperar una remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mayor del 90 % y de demanda química oxígeno (DQO) mayor del 85 %, y una producción de gas de 184 litros diarios por m<sup>3</sup> de biodigestor. Las diferencias principales entre los dos tipos de biodigestor radican en los costos de los materiales. Un biodigestor en geomembrana de 3.5 m de largo y un diámetro de 1.20 m cuesta \$234,000 (100 USD ), mientras que el de plástico cuesta \$110,000 (33 USD ).

Servian, et al., (2009) [62] Evaluaron un biodigestor de flujo continuo en la Finca Integrada Orgánica (FIO), alimentado con heces fecales y orina humanas y uno de plástico colapsable ti-

po batch, ubicado en el relleno sanitario (RS), alimentado con lodos sépticos de las residencias estudiantiles de la Universidad EARTH. El biodigestor fue alimentado durante 35 días antes de tomarse las primeras muestras, este fue el tiempo que tardó el biodigestor en dar inicio a una producción de biogás significativa. Para cuantificar el volumen del gas producido, se empleó un medidor de volumen para gas propano de uso residencial. Debido a la baja presión del biogás producido en el interior de los digestores, la recolección de datos válidos se vio limitada, por lo que se realizó una estimación por estequiometría, se obtuvo un estimado de 20.9 L/m<sup>3</sup> por día para el biodigestor de la FIO y 26.7 L/m<sup>3</sup> por día en el RS, equivalente a 0.21 kWh/m<sup>3</sup> por día y 0.27 kWh/m<sup>3</sup> por día, respectivamente.

El instrumento empleado para medir la proporción de metano (CH<sub>4</sub>) fue un monitor infrarrojo, y para medir la concentración de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) se utilizó otro medidor específicamente diseñado para este gas. El valor reportado es el promedio de tres repeticiones por muestra, con una frecuencia de cada 10 días, durante 2 meses. Para medir dichas concentraciones con ambos instrumentos, se tuvo que emular una corriente de gas en el sensor. En ambos casos se obtuvo un 63 % de concentración de gas metano (CH<sub>4</sub>).

Se reportaron valores de 11.3 mg/L ± 6.2 mg/L y 318.8 mg/L ± 3.4 mg/L de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en la FIO y en el RS, respectivamente. Se sospecha que dichas diferencias pueden atribuirse al origen del agua que ingresa por cada descarga al sistema. El origen del afluente en la FIO es directamente del inodoro al biodigestor (excretas humanas con agua). En cambio, en el RS son lodos sépticos que fueron recolectados en el tanque séptico de las residencias estudiantiles. Los resultados de calidad de agua demuestran que algunos parámetros tomados no cumplen con los límites permisibles en la legislación de Costa Rica para el uso del biogás en motores.

El resultado de los sólidos suspendidos volátiles indicó que hubo una reducción del 74.2 % en la FIO y del 49 % en el RS, y la DQO presenta una reducción del 88.5 % y del 43.7 % respectivamente. La calidad del biogás producido en ambos tratamientos, es considerada como buena, debido a que presentan promedios similares en la cantidad porcentual de CH<sub>4</sub> (63 %).

Ferrer, et al., (2011) [29] Adaptaron biodigestores domésticos de bajo costo (tubulares tipo flujo pistón de polietileno o PVC) a condiciones climáticas extremas de la meseta Andina. Su objetivo fue caracterizar la producción de biogás en dos biodigestores domésticos situados a gran altura, que opera bajo condiciones psicrófilas (temperaturas menores de 20 °C) con



estiércol de vaca.

Se usaron invernaderos para aumentar la temperatura del proceso y minimizar las fluctuaciones de temperatura en la noche. La cuantificación de biogás y metano es necesaria para evaluar el desempeño de los sistemas, mejorar la producción de biogás y reducir los costos de capital, lo cual ayudaría al cumplimiento de la fuerte demanda de biodigestores de bajo costo por familias y granjas de los Andes.

La producción diaria de biogás fue monitoreada usando un medidor de gas comercial de diafragma de baja presión y un medidor de gas de cúpula flotante. El contenido de metano fue medido indirectamente deducido por la medición de dióxido de carbono.

La producción específica de biogás en biodigestores domésticos diseñados para las comunidades Andinas fueron relativamente bajos ( $0.32-0.36 \text{ m}^3/\text{Kg}$  de sólidos volátiles (SV)) en comparación con los biodigestores implementados en zonas tropicales ( $>1 \text{ m}^3/\text{Kg}$  de sólidos volátiles (SV)), sin embargo el contenido de metano fue alto (63-67%), indicando un buen desarrollo de las poblaciones metanogénicas en los biodigestores.

En el biodigestor tubular de polietileno implementado a 3400 msnm de  $2.4 \text{ m}^3$  de volumen útil, con una velocidad de carga orgánica (OLR) de  $1.29 \text{ Kg SV}/\text{m}^3 / \text{día}$ , con una temperatura  $<25 \text{ }^\circ\text{C}$  dentro del invernadero y un tiempo de retención de 60 días con una dilución del sustrato 1:2, se obtuvo una producción específica de biogás de  $0.36 \text{ m}^3/\text{kg SV}$  y una tasa de producción de biogás de  $0.47 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{día}$ . En el biodigestor tubular implementado a 2800 msnm de  $7.5 \text{ m}^3$  de volumen útil, con una OLR de  $0.22 \text{ KgSV}/\text{m}^3/\text{día}$ , con una temperatura  $<25 \text{ }^\circ\text{C}$  dentro del invernadero y un tiempo de retención de 90 días y una dilución del sustrato 1:4, se obtuvo una producción específica de biogás de  $0.32 \text{ m}^3/\text{kg SV}$  y una tasa de producción de biogás de  $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{día}$ .

Por esto se concluye que a temperaturas de operación relativamente bajas, la producción de biogás es significativamente menor en comparación con temperaturas medias ( $>25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), lo que provocaría que los biodigestores implementados en estas zonas de clima frío tengan un costo elevado ya que se requiere un sistema de calefacción, un mayor volumen y un tiempo de retención mayor.

Iñiguez y Camacho (2011) [21] Evaluaron un reactor de manto de lodo con flujo ascendente con un volumen de  $2500 \text{ m}^3$  alimentado con aguas residuales de una empresa de bebidas fermentadas. Su objetivo principal fue investigar la conservación de la biomasa en el reactor

a distintas velocidades ascendentes de alimentación, así como la eficiencia de remoción de la materia orgánica en términos de la DQO y la producción de biogás.

El reactor operó a una temperatura promedio de 35 °C. Se tomaron muestras del afluente y del efluente, las cuales se analizaron diariamente para determinar los parámetros y cálculos de desempeño del reactor.

Los valores de pH estuvieron entre 6.8 y 7.4, la eficiencia de remoción en términos de DQO fue de 87% con velocidades ascendentes de alimentación de 0.6 y 0.5 m/h, para velocidades más altas de 1 y 0.9 m/h las remociones fueron 63.2 y 65.8%, en cuanto a la producción de biogás, está se incrementó significativamente conforme se fue incrementando la tasa de carga orgánica soluble de 0.22 kg DQO/m<sup>3</sup>/d para una velocidad ascendente de alimentación de 1 m/h hasta 5.19 kg DQO/m<sup>3</sup>/d para velocidad ascendente de 0.6 m/h.

Por lo que se concluye que a mayores velocidades ascendentes de alimentación, se obtienen porcentajes más bajos de remoción de DQO, menor volumen de agua residual tratada y menor carga orgánica al reactor, por eso también fue menor la producción de biogás.

## **1.5. Producción de biogás a nivel laboratorio**

En este apartado, se presentan investigaciones realizadas a nivel laboratorio, es decir, en condiciones ideales y a volúmenes pequeños para que el proceso de la producción de biogás se lleve a cabo de la mejor manera posible.

Magaña, et al., (2006) [47] Evaluaron el proceso de digestión anaerobia a partir de estiércol de cabras realizando dos experimentaciones una con matraces kitazato de cristal, con capacidades de un litro como depósito de la mezcla estiércol-agua y otra con un biodigestor a escala laboratorio, con capacidad volumétrica de 9 litros. El objetivo de esta investigación fue determinar la producción diaria de biogás al utilizar este tipo de estiércol.

En el caso de la experimentación con matraces el proceso se llevó a cabo bajo una temperatura controlada de 35 °C dentro de una tina con agua calentada por una resistencia, una concentración estiércol-agua de 1:2.5 y el pH fue de 7.81.

En la experimentación con el biodigestor fabricado de acero inoxidable, utilizaron como fuente de calor una parrilla, para la homogenización de la mezcla un agitador manual y para monitorear su comportamiento operacional le instalaron un termómetro de carátula, un manómetro y un controlador de temperatura automático.

Como resultados encontraron que el pH se tornó neutro, la producción de biogás se obtuvo a partir del primer día de la digestión anaerobia, la cual se detectó con el desplazamiento de la aguja del manómetro; la presión máxima alcanzada fue de 5 psi. Con un tiempo de retención de 34 días, se obtuvo una producción de 1.5 m<sup>3</sup> de biogás al día con un porcentaje de metano a los 21 días de 62.71 %.

Se puede concluir que utilizar estiércol de cabras para producir biogás es factible en cuanto a la cantidad diaria de biogás obtenido, sin embargo, no se toma en cuenta la cantidad de excretas que se necesitarían para cargar un biodigestor con un volumen mayor al que utilizan en la experimentación, además de la cantidad de energía requerida para deshacer las bolitas para tener una mezcla homogénea.

González, M. E., et al., (2015) [31] Calcularon el potencial bioquímico de metano (BMP, por sus siglas en inglés) de residuos provenientes de la agroindustria (residuos de plátano, mango y papaya).

El valor de BMP fue calculado en función del volumen de metano producido por gramo de DQO de los residuos, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$BMP = \sum_{n=1} \frac{X_n + 1}{S} \quad (1.1)$$

Donde

$BMP$  = potencial bioquímico de metano (mlCH<sub>4</sub> / gSV)

$X$  = producción diaria de metano (ml)

$n$  = unidad de tiempo (d)

$S$  = cantidad de sustrato inicial (g DQO).

Para ello se realizaron experimentos a escala laboratorio en biorreactores en lote (carga discontinua), utilizando botellas serológicas de 120 ml de capacidad con un volumen de trabajo de 80 ml. Se incubaron en condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno) por 63 días en agitación constante a 120 rpm y 35 °C. Tanto el biogás como el metano, fueron monitoreados de manera simultánea a lo largo de todo el proceso, recolectando muestras diariamente durante 63 días. El biogás fue cuantificado midiendo la presión manométrica (en milibares) de cada uno de los biorreactores con un manómetro digital, el metano fue cuantificado en un equipo Clarus 500 (Perkin Elmer), equipado con un detector de ionización de llama y una columna capilar. El mayor BMP se obtuvo con el residuo de plátano 63.89 ml CH<sub>4</sub>/g DQO, ya que el de mango y el de papaya fueron 53.50 y 54.8 ml CH<sub>4</sub>/g DQO, respectivamente. Este resultado indica que los residuos de plátano son fácilmente biodegradables y que son transformados a metano. Los residuos de plátano resultaron ser mayormente biodegradables en comparación con los otros dos residuos (mango y papaya), sin embargo, hay que considerar que en las grandes cantidades de desechos orgánicos que se generan día a día no son de un sólo tipo de residuos sino una mezcla de muchos, lo que podría provocar una reducción en la producción de biogás.

(Grzegorz Brudecki, et al, 2015) realizaron una investigación en la que su objetivo fue realizar la caracterización de pastos marinos para evaluar los potenciales teóricos y experimentales del biogás. Los experimentos fueron realizados en viales de suero sellados con una goma gruesa, la mezcla fue de 100 g (pastos marinos con 50 g de inóculo) a 37 °C y 120 rpm en ausencia de oxígeno, con un tiempo de retención de 50 días y el pH osciló entre 7 y 7.1 en todos los experimentos. Los resultados muestran que la producción específica del metano decrece con una alta carga de sólidos volátiles (SV), indicando con esto una inhibición del proceso anaeróbico cuando incrementa la concentración de pastos marinos. Cuando se compara el potencial teórico del biogás el cual fue calculado de acuerdo a la fórmula de Buswell, obteniendo 405 ml CH<sub>4</sub> /g SV y el potencial práctico 122 ml CH<sub>4</sub>/g SV se observa una conversión de materia orgánica del 30 % a metano para esta especie de pasto marino (*Halodule uninervis*).

Li Sun, et al., (2013) [65] examinaron la estructura de la comunidad de bacterias degradantes de celulosa en cuatro biodigestores a escala laboratorio, operando semicontinualmente con estiércol de vaca solo y en co-digestión con paja de trigo con y sin pre tratamiento a diferentes temperaturas. El objetivo de este estudio fue examinar la respuesta en la comunidad bacteriana para la adición de paja y el efecto por un cambio de la temperatura de operación de mesofílica a termofílica. Todos los biodigestores fueron iniciados a una temperatura mesofílica 37 °C y

con una carga orgánica de 2.8 g SV/L por día, en un tiempo de retención de 25 días. Los rendimientos de metano fueron muy similares en todos los experimentos sin aumento en respuesta a la adición de paja de trigo con y sin pre tratamiento o al cambio de temperatura (de 37 a 52 °C ), es decir, que no afectó significativamente en la producción de metano los diferentes cambios realizados durante el proceso de digestión anaerobia.

Berlian Sitorus, et al., (2013) [64] realizaron una mezcla de frutas y verduras para llevar a cabo la digestión anaerobia, dentro de un digester tipo batch de una sola etapa con un volumen de 200 litros en 14 semanas, el total de desecho fue de 160 Kg (80 % desechos vegetales y 20 % desechos de frutas). Los cuales fueron mezclados manualmente al inicio del proceso de carga, la alimentación fue llevada a cabo por dos semanas, operando a temperatura ambiente en el rango mesofílico 27-31 °C, la temperatura y la humedad fueron monitoreadas diariamente usando un termo-higrómetro, se obtuvo un rango de pH de 5.3 a 6.8. La concentración del contenido de metano producido en el reactor fue monitoreado semanalmente. El objetivo fue determinar el rendimiento del proceso de digestión anaerobia usando una mezcla de frutas y verduras como sustrato en una sola alimentación para la producción de biogás. El contenido más alto de metano en el biogás fue 65 % con un flujo de biogás de 20-40 ml/min y un rendimiento de 0.387 L CH<sub>4</sub>/g SV. El inconveniente de usar este tipo de residuos orgánicos es la rápida acidificación debido a su bajo pH y con esto la gran producción de ácidos grasos volátiles (AGV), lo que reduce la actividad metanogénica dentro del biodigestor.

Tong Zhang, et al., (2014) [74] realizaron una investigación utilizando estiércol de pollo como materia prima para la producción de biogás. China produce cada año  $3.97 \times 10^9$  toneladas de estiércol de aves de corral y de ganado, específicamente de estiércol de pollo produce  $4.03 \times 10^8$  toneladas por año y alrededor de  $7.55 \times 10^8$  toneladas de paja de cereales. El estiércol fresco de pollo (EP) tiene un alto contenido de nitrógeno orgánico total por lo que se realizaron un conjunto de ensayos de la digestión anaerobia a partir de este desecho, usando tres principales residuos de cereales (tallos de maíz, paja de trigo y paja de arroz) como co-sustratos con varias combinaciones de mezcla para complementar las características adecuadas en la producción de biogás. Los experimentos se llevaron a cabo a nivel laboratorio, en matraces cónicos como biodigestores tipo batch de 1 L, con un volumen de trabajo de 700 ml a 35 °C mezclado manualmente una vez al día, con un tiempo de retención de 60 días. La co-digestión de EP y tallos de maíz (TM) mostraron altas producciones de biogás acumulativos que la de EP/paja de trigo (PT) y EP/paja de arroz (PA). El valor entre 15 y 25 ha sido sugerido como el intervalo óptimo

de la relación C/N para la co-fermentación de EP con residuos de cereales. El rendimiento más alto de metano fue en la co-digestión de EP/PT con 383 ml/g SV.

Marta Oleszek, et al, (2014) [56] Compararon la composición química y la eficiencia de la producción de biogás en el proceso de fermentación de metano de ensilajes silvestres y variedades cultivadas de hierba cinta. Fueron consideradas las propiedades fisicoquímicas tales como materia seca, materia orgánica, proteína, grasa, fracción de fibra cruda, contenido de micro y macroelementos.

La carga inicial fue establecida de 60 g SV/L con una relación de 1:1, el volumen de biogás fue determinado por el método de líquido desplazado. El rendimiento más alto fue obtenido en el día 16 para la variedad cultivada y en el día 18 para el silvestre.

Las variedades cultivadas fueron caracterizadas por un alto rendimiento de biogás ( $406 \pm 21$  Ndm<sup>3</sup>/Kg SV) que el silvestre ( $120 \pm 16$  Ndm<sup>3</sup>/Kg SV). Esto fue relacionado a la composición de plantas, esencialmente el alto contenido de fracciones de fibra cruda y ceniza, los cuales podrían reducir la cantidad y calidad del biogás. El decrecimiento significativo en el rendimiento del biogás entre los picos fue probablemente causado por la acumulación de ácidos grasos volátiles.

## 1.6. Conclusiones

Aunque todos los biodigestores tengan el mismo principio de operación y con ello cumplan el mismo objetivo (producción de biogás y bioabono) la evaluación de cada uno es diferente, ya que su comportamiento y rendimiento durante el proceso, dependerá de parámetros como su volumen útil, material de construcción, tipo de materia orgánica, lugar de instalación, sistema de agitación, temperatura ambiente, temperatura dentro del biodigestor, pH, presión etc.; lo que conlleva a realizar investigaciones de los diferentes biodigestores para obtener resultados que permitan conocer y analizar su comportamiento en función a sus características. Como se pudo observar la producción de biogás a nivel laboratorio, es muy importante cuando se quiere analizar una materia orgánica diferente, una que no ha sido estudiada por muchos investigadores, ya que con volúmenes pequeños de operación se pueden analizar una cantidad mayor de parámetros durante el proceso; sin embargo no se puede comparar con una práctica a escala rural, es decir, con un volumen mayor y en condiciones no controladas.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos

### 2.1. Introducción

En este capítulo se aborda un panorama general de los principales conceptos de las energías renovables, lo esencial de la bioenergía y todo lo que comprende, para entender el proceso de producción de biogás y bioabono, incluyendo los diferentes tipos de tecnologías que existen para dicho fin.

La fuente de energía más importante es la radiación solar. El sol, es una estrella cuyo diámetro mide  $1.392 \times 10^9$  m, irradia en un segundo más energía que la consumida por la humanidad en toda su historia, la edad estimada de la estrella es de 5 mil millones de años. Está situada a la distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  m de la Tierra, unos ocho minutos de viaje a la velocidad de la luz. Visto desde la tierra, el sol rota alrededor de su eje una vez cada cuatro semanas [37]. La energía radiante del Sol tiene su origen en una serie de reacciones de fusión, de las cuales la más importante es aquella en que cuatro átomos de hidrógeno se fusionan para dar un átomo de helio, dos positrones y dos neutrinos. En la reacción se produce una transformación de masa en energía, de acuerdo con la ecuación de Einstein:  $E = \Delta m C^2$ , que explica la emisión de 26.2 MeV de energía radiante por cada cuatro átomos de hidrógeno que se fusionan [32]. La radiación solar es almacenada por las plantas, por medio de la fotosíntesis, dando lugar a la formación de proteínas, carbohidratos y grasas.

## 2.2. Energías renovables: conceptos generales

Se denominan fuentes energéticas renovables las que son de origen natural y pueden emplearse ilimitadamente, por dos razones:

- Su suministro es abundante (el sol, el viento) y prácticamente inagotable.
- Las materias primas de las que provienen esas energías, se pueden renovar (biomasa), caracterizándose por tener un bajo impacto ambiental [46].

Entre estas fuentes de energía se encuentran la hidráulica, solar, eólica, geotérmica, oceánica y biomasa; las cuales existen debido a la energía de la radiación solar, la atracción gravitacional de la luna, el sol y el calor interno de la tierra.

## 2.3. Bioenergía

Es toda aquella energía proveniente de la transformación de la biomasa mediante un proceso determinado.

### 2.3.1. Biomasa

Es toda aquella materia orgánica proveniente de seres vivos, tales como estiércol de animales, madera, frutos, granos, animales, etc., es decir, es toda la masa viviente que existe sobre la Tierra. De los 173 000 TW que llegan del sol a la Tierra en forma de radiaciones de distinta longitud de onda, sólo 40 TW se convierten en materia orgánica por el proceso de fotosíntesis (Figura 2.1), en este proceso se utiliza la energía solar para transformar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y nutrientes en hidratos de carbono, grasas y proteínas, vitaminas, hormonas, etc., que conforman las plantas [32].

Cuando se habla de biomasa se hace referencia a un almacenamiento de energía solar reciente, pues los propios combustibles fósiles son biomasa que ha sido “procesada” por la naturaleza a lo largo de millones de años, hasta llegar a convertirse en combustibles con una densidad de energía mayor que la de la biomasa de producción reciente. La densidad de energía es la cantidad de energía contenida en la unidad de masa del combustible considerado. Incluso podría afirmarse que los combustibles fósiles son “energía solar fosilizada”, almacenada en los compuestos de carbono que son el producto de lentos procesos de transformación que tienen lugar a lo largo de eras geológicas [32]. La biomasa se clasifica según sus fuentes de origen (Figura



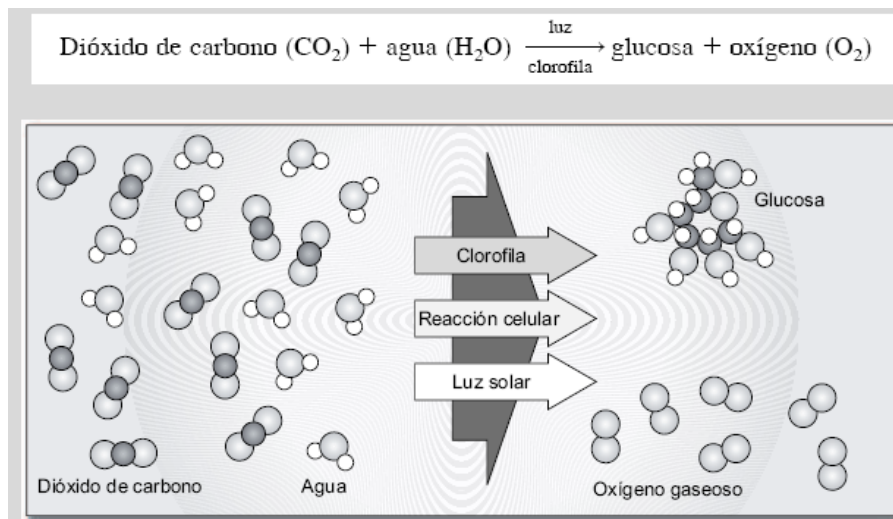


Figura 2.1: Proceso de fotosíntesis . [16]

2.2) en primaria y secundaria.

La biomasa primaria es la energía solar convertida por la vegetación, mediante el proceso de fotosíntesis, en materia orgánica (energía química almacenada). La biomasa secundaria es la que puede ser transformada por otros seres vivos que se nutren de la misma (biomasa de los residuos animales). Al respecto este trabajo se enfoca principalmente a la producción de biogás y bioabono a partir del estiércol de ganado bovino. Asimismo, diversas actividades industriales que manejan biomasa vegetal o animal generan subproductos. Por último, los núcleos de población, fruto de la actividad cotidiana de sus habitantes, también generan residuos sólidos (residuos sólidos urbanos) y residuos líquidos (aguas residuales urbanas).

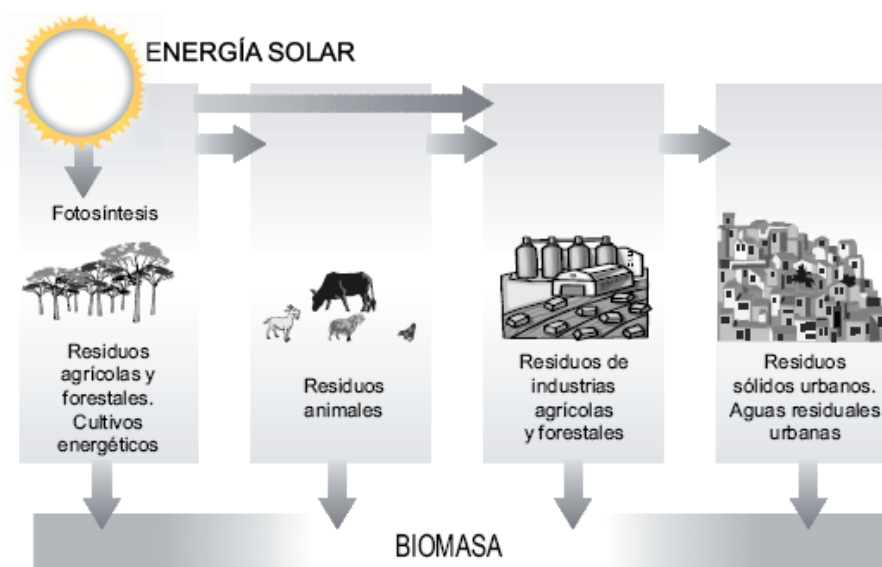


Figura 2.2: Fuentes de biomasa. [16]

## 2.3.2. Procesos de conversión de la biomasa en energía útil

A partir del potencial de la biomasa, están disponibles diferentes materias primas para su conversión a biocombustibles, así como para aplicaciones de generación de energía eléctrica. Existe gran variedad de procesos para conversiones de biomasa que dependen del tipo y cantidad de materia prima, el medio ambiente y las condiciones económicas, etc., los cuales son los siguientes:

### 2.3.2.1. Conversión termoquímica

Los procesos termoquímicos producen la transformación química de la biomasa por la aplicación de calor, cuando la biomasa se quema de manera incompleta su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos, dependiendo de la tecnología utilizada [67]. Se utilizan tres procesos principales para la conversión termoquímica de la biomasa, la combustión, la gasificación y la pirolisis.

Combustión:

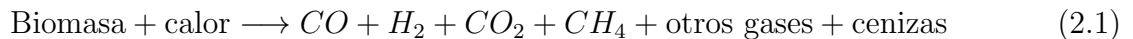
Es la oxidación total de la biomasa, y se utiliza para convertir la energía química almacenada en la biomasa en energía térmica, la energía mecánica en energía eléctrica y también, en dispositivos hornos, estufas, turbinas de vapor, calderas, etc., en la práctica la combustión es factible sólo para la biomasa con un contenido de humedad menos de 50 %, a menos que la biomasa se someta a un proceso de pre-secado. La biomasa con alto contenido de humedad es más adecuada para los procesos de conversión biológicos [42].

Gasificación:

Comprende aquellos procesos que producen principalmente gases de la biomasa sólida sometida a la acción del calor, en condiciones de defecto de oxígeno, en un reactor gasificador. La transformación de la biomasa ocurre en tres etapas térmicas: a) evaporación del agua residual de la biomasa; b) pirólisis de la biomasa quemada a temperaturas superiores a 400 °C, con formación de gases y alquitrán; c) gasificación total a temperatura mayor de 700 °C y obtención de nuevos gases y cenizas. Estos gases principalmente son: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en diversas proporciones según materia prima y condiciones del proceso. Los productos volátiles formados en la primera etapa dan una segunda serie de reacciones con los gases reactivos para formar

una compleja mezcla de compuestos orgánicos y los componentes del gas de síntesis: monóxido de carbono e hidrógeno.

La biomasa empleada puede ser madera, cascarilla de arroz o cáscara de coco. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante, con altos contenidos de CO y H<sub>2</sub>, ésta se procesa a una temperatura mínima de 700-800 °C y máxima de 1000 °C. Estas temperaturas permitan desarrollar la gasificación (ecuación 2.1) como una combustión muy controlada, cuyo límite de oxígeno es 10-50 % del necesario para una combustión completa. El poder calorífico del gas de síntesis es de 14 000-19000 KJ/m<sup>3</sup> mientras que el del gas pobre es de 7000 KJ/m<sup>3</sup> [67].



Pirólisis:

Consiste en la ruptura de la materia orgánica por la acción del calor (ecuación 2.2), en ausencia o cantidad restringida de aire, realizada generalmente en un horno. Esta ruptura se produce a través de una serie completa de reacciones químicas, las cuales a su vez están sujetas a una serie de variables operacionales; entre ellas están: la naturaleza de la biomasa, temperatura, tiempo total de retención en el horno y presión en su interior. La pirólisis comienza a unos 275 °C y se completa a los 450 °C [67]. Lo que queda como materia sólida es el carbón vegetal, que es un combustible cuya densidad de energía viene a ser el doble que de la biomasa original. Según sea el contenido en humedad de la madera original y la eficiencia que se logre en el proceso, se suelen requerir de 4 a 10 toneladas de biomasa vegetal para obtener una tonelada de carbón vegetal [32].

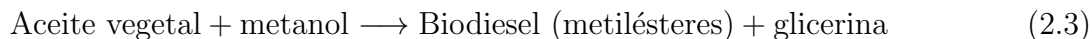


### 2.3.2.2. Conversión fisicoquímica

Biodiesel:

Se puede obtener a través de aceites vegetales, sean nuevos o usados y grasas de origen animal mediante el proceso de transesterificación, que consiste en una reacción entre un aceite

vegetal con un alcohol, generalmente metanol o etanol, la cual da como producto alquilésteres, que constituyen el biodiesel y la glicerina (ecuación 2.3). Los aceites vegetales están contenidos en las semillas de algunas plantas en cantidades muy significativas. Así, las semillas de la soja contienen 18 % de aceite contra un 47 % de la palma y un 45 % del girasol [67].

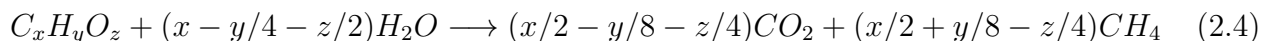


### 2.3.2.3. Conversión bioquímica

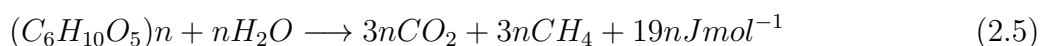
Asimismo, existen técnicas de conversión bioquímica (fermentación alcohólica, digestión anaeróbica, descomposición aeróbica) con las que se pueden obtener combustibles gaseosos y líquidos y generar calor y electricidad o, en el caso del producto (compost) obtenido con la descomposición aeróbica (presencia de oxígeno), aprovechar el calor liberado en el proceso mediante el empleo de una bomba de calor para suministrar calor a baja temperatura [16]. Este trabajo se enfoca a la conversión bioquímica de biomasa a biogás y bioabono mediante el proceso de digestión anaerobia que se describe con más detalle a continuación.

### 2.3.3. Digestión anaerobia

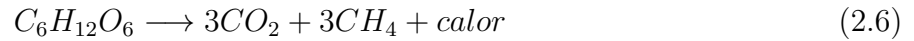
Es un proceso de descomposición de la biomasa provocado por microorganismos, el cual se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y presencia de agua. Las bacterias y hongos responsables de este tipo de descomposición de biomasa son capaces de obtener la energía que necesitan para mantenerse vivas, rompiendo enlaces de los carbohidratos y convirtiendo parte del carbono presente en  $\text{CO}_2$  y otra parte en  $\text{CH}_4$ . Se denomina digestión por que el proceso es similar al que se produce en el tracto digestivo de los rumiantes [32]. La digestión anaerobia es una tecnología probada comercialmente y es ampliamente utilizada para el tratamiento de residuos orgánicos con alto contenido de humedad, es decir, 80-90 % de humedad [42]. La reacción general (2.4) que describe la digestión anaerobia es la siguiente [32]



Según este esquema, la reacción global (2.5) para la descomposición anaeróbica de la celulosa es :

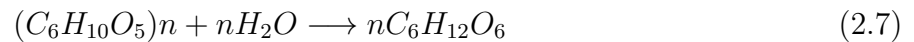


A su vez, la reacción global (2.6) para la descomposición anaeróbica de la glucosa se puede escribir del siguiente modo:



Se puede estimar que alrededor del 92% de la energía contenida en los enlaces de la glucosa permanece en los enlaces del metano, y el 8% lo emplearían las bacterias para mantenerse con vida y multiplicarse [32].

La digestión anaerobia se lleva a cabo en cuatro etapas principales hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, cada una involucra diferentes comunidades bacterianas [67] [73]. En la primera etapa, las bacterias fermentativas hidrolizan externamente la materia orgánica, desdoblado las moléculas y transformando lo sólido en soluble. Se realiza por la actividad de enzimas extracelulares de las bacterias [57]. Las proteínas se hidrolizan a aminoácidos, los lípidos a ácidos grasos de cadena larga [32] y los carbohidratos a azúcares. Si se parte de celulosa, la reacción (2.7) que resume lo que ocurre en esta primera fase sería la siguiente:



En la etapa de acidificación, la materia orgánica compleja es transformada principalmente por saprofitos, la mayoría de los cuales son bacterias facultativas capaces de reproducirse rápidamente, y estas no son tan sensibles a los cambios ambientales. Estas bacterias acetogénicas convierten gran parte de la materia orgánica en ácidos grasos y agua. Así las grasas, las proteínas y los carbohidratos después de hidrolizados y fermentados en la primera etapa, son luego biológicamente convertidos a sustancias más simples [57] tales como ácidos grasos volátiles, alcoholes, amoníaco ( $NH_3$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) [51]. Dentro de las bacterias conocidas como acidogénicas se encuentran especies de *Clostridium*, *Desulphovibrio*, *Corynebacterium*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus* y *Escherichia coli*.

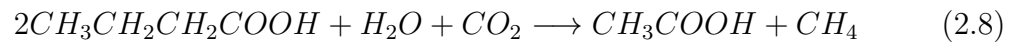
Durante la acetogénesis alcoholes y ácidos grasos volátiles son oxidados anaeróbicamente por bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno en acetato, hidrógeno y  $CO_2$  [32].

En la etapa final, los metanogénos acetotrópicos e hidrogenotrópicos transforman acetato,  $H_2$  y  $CO_2$ , en una mezcla de  $CH_4$  y  $CO_2$  [32]. En esta etapa intervienen bacterias metanogénicas o formadoras de metano, dentro de este grupo se encuentran *Metanobacterium*, *Metanobacillus* y *Methanozarcina*, éstas son estrictamente anaerobias y de lento crecimiento. El metabolismo

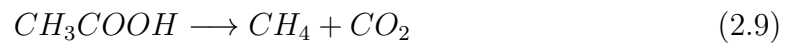
para producir biogás puede realizarse a partir de ácidos volátiles (reacciones 2.8 y 2.9), alcohol (reacción 2.10) o por la misma reducción del dióxido de carbono (reacción 2.11), como se muestra a continuación [57]:

- Metanización a partir de los ácidos volátiles.

- Ácido butánico



- Ácido acético



- Metanización a partir de alcohol y dióxido de carbono.

- Propanol



- Metanización a partir de la reducción de dióxido de carbono.



El proceso de digestión anaerobia que se lleva a cabo dentro del biodigestor cumple con la primera ley de la termodinámica, conocida también como el principio de la conservación de la energía la cual afirma que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma [13] (Figura 2.3).

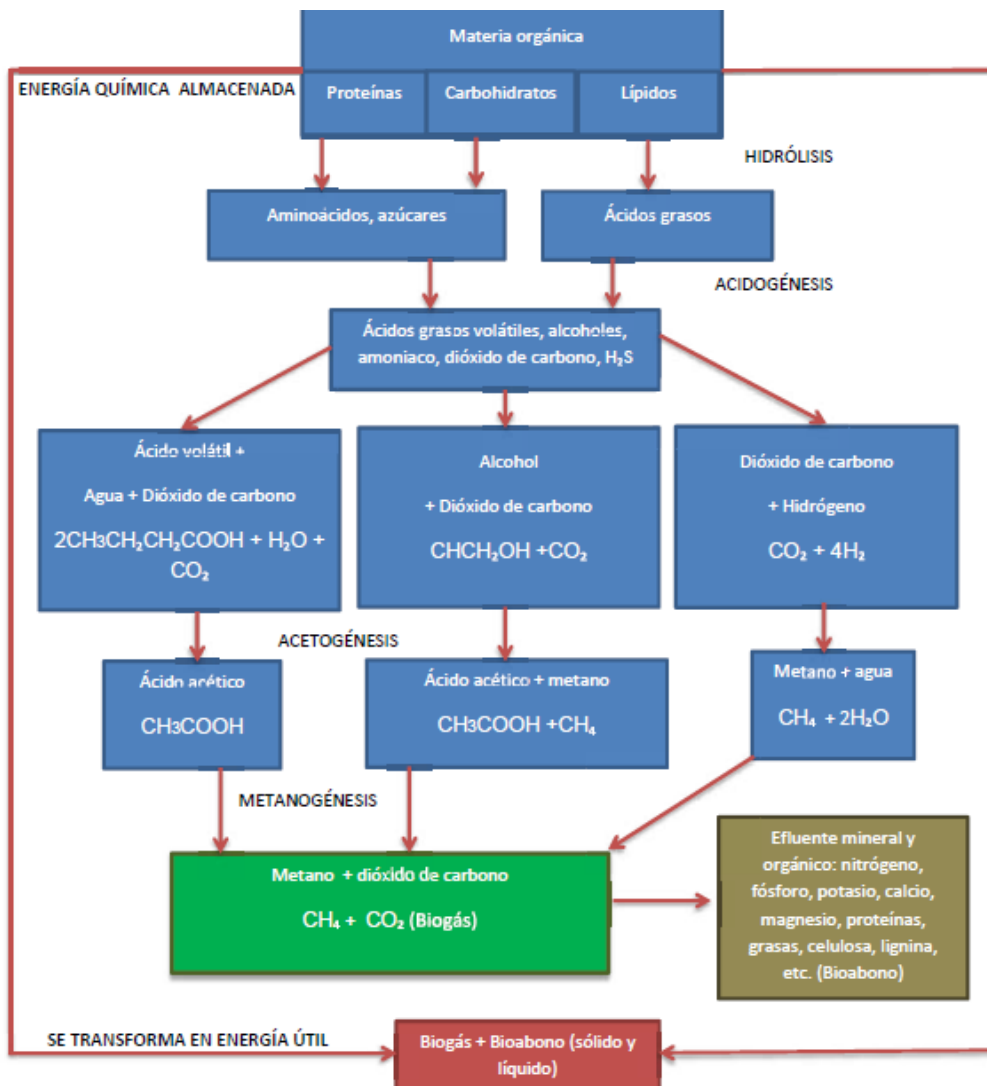


Figura 2.3: Proceso de transformación de la energía química almacenada en la materia orgánica en biogás y bioabono.

## 2.4. Biogás

Es un biocombustible gaseoso, que se obtiene a partir de la digestión anaerobia, el cual contiene una mezcla de gases denominada biogás, cuyo principal componente es el metano ( $\text{CH}_4$ ) con alrededor del 50-70 %, seguido del  $\text{CO}_2$  con 30-40 %, además de contener otros gases en menor proporción como el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vapor de agua, monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), entre otros. El biogás tiene un poder calorífico entre 4500 a 5600 kilocalorías por metro cúbico [19].

El metano es la primera molécula de la serie de los alcanos. Estos son hidrocarburos, es decir, que tienen sólo átomos de carbono e hidrógeno. Es un excelente biocombustible y posee una elevada densidad de energía (54 kJ/g) y una densidad de  $0.7167 \text{ Kg/m}^3$  [19].

El biogás se puede obtener natural y espontáneamente en distintos ámbitos tales como los pantanos, yacimientos subterráneos, cultivos de arroz e incluso en el estómago de los animales [32]. Por otro lado también se puede producir artificialmente en dispositivos cerrados y sellados herméticamente tales como los biodigestores. La combustión del biogás no produce humos visibles y su carga en ceniza es infinitamente menor que el humo proveniente de la quema de madera [48].

## 2.5. Sistema de biodigestión anaerobia

Éste comprende una amplia gama de subsistemas, los cuales al estar en coexistencia cumplen un objetivo en común, la producción de biogás y bioabono, paralelamente se convierte en una alternativa para la adecuada disposición final de los desechos orgánicos.

Los subsistemas son divididos en:

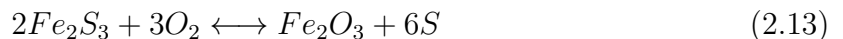
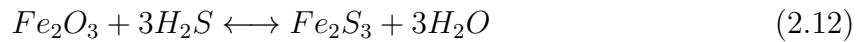
1. Subsistema de adecuación y pre tratamiento de la materia orgánica. Es un recipiente en el que se colocan los desechos orgánicos y agua para ser mezclados, en caso de ser necesario, se realiza el pre tratamiento de la materia orgánica con el fin de adecuar el tamaño de partícula, ya sea cortando o moliendo, lo que facilita la hidrólisis, además de retirar elementos indeseables como piedras, basura inorgánica, etc. El residuo como tal contiene un elevado porcentaje de agua y esta agua no produce biogás, pero como la digestión anaerobia se trata de un proceso microbiológico, el agua resulta imprescindible para que los microorganismos se desarrollen y realicen su trabajo adecuadamente. También se puede realizar una co-digestión, que es la combinación de varias mezclas de sustratos orgánicos biodegradables para aumentar el potencial de producción de biogás por kilogramo de mezcla degradado.
2. Subsistema de transformación de materia orgánica en energía útil (biodigestor). Este es el componente central de todo el sistema ya que logra proporcionar las condiciones adecuadas para el proceso, éste dispositivo es capaz de convertir la materia orgánica en energía útil en este caso el biogás y como subproducto un material rico en nutrientes (bioabono). Un biodigestor en buen funcionamiento puede producir de 200 a 400 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de biomasa con un contenido de metano entre el 50 y el 75 % [49].
3. Subsistema de purificación del biogás. El ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) es el compuesto que le



da al biogás el olor característico a huevo podrido o pantano. Existen tres razones primordiales [69] por las que se considera que la remoción del  $H_2S$  en el biogás es importante:

- Si el biogás es utilizado para equipos tales como generadores eléctricos, microturbinas y otros, el  $H_2S$  puede causar daños internos. En el caso de los generadores eléctricos, hará un efecto de corrosión directamente en los pistones.
- El  $H_2S$  es extremadamente nocivo para la salud; bastan 20-50 ppmv (partes por millón en volumen) en el ambiente, para causar un malestar agudo que lleva a la sofocación y a la muerte por sobreexposición, el cual es absorbido rápidamente por los pulmones.
- Si el  $H_2S$  no se remueve, la combustión del biogás generará dióxido de azufre ( $SO_2$ ), que además de ser dañino para el medio ambiente (promotor de la lluvia ácida), es tóxico para el ser humano y se incumple con los requisitos legales de emisiones. El mismo es absorbido principalmente por el sistema nasal y la exposición a altas concentraciones, por cortos períodos de tiempo, puede irritar el tracto respiratorio, causar bronquitis y congestionar los conductos bronquiales de los asmáticos, por lo tanto la concentración máxima permitida en los lugares de trabajo es de 2 ppmv.

En términos generales el  $H_2S$  puede ser removido utilizando tecnologías “secas” o tecnologías “húmedas”. Nos enfocaremos en las tecnologías secas. Las tecnologías secas se conforman de sustratos, por donde fluye el biogás libremente, reaccionando química o físicamente con el mismo, reteniendo así el  $H_2S$ , a su paso. El sustrato “seco” más utilizado es una forma y fuente de óxido de hierro, el cual reacciona con el  $H_2S$ , para formar sulfuro de hierro, un compuesto no gaseoso, por tanto no podrá seguir el flujo con el biogás. El método se apoya en la reacción química siguiente (2.12 y 2.13) [69]



Además del  $H_2S$ , el biogás también contiene vapor de agua, lo que puede ocasionar que en el recorrido de la tubería éste se condense y pueda obstruir el paso, por esto es necesario un filtro que contenga agua ya que al pasar la mezcla de gases por el agua, el vapor de agua se condensa y no continua en el recorrido.

4. Subsistema de almacenamiento de productos generados. La producción de biogás es continua a lo largo de todo el día; pero el consumo solo es por unas horas. Por este motivo será necesario almacenar el biogás producido durante las horas que no se consuma, se recomienda utilizar bolsas de geomembrana, debido a la degradación del material que provocan los gases contenidos en el biogás. El biogás también puede ser envasado en cilindros, sometiéndolo a un proceso de presurización y compresión para transportarlo adecuadamente y utilizarlo en aplicaciones diferentes de su combustión directa. Otro producto obtenido es el material que ya ha sido digerido tanto el sólido (biosol) como el líquido (biol), que en conjunto se le denomina bioabono. Este afluyente (bioabono) puede ser utilizado como biofertilizante para los cultivos o también como mejorador de los suelos, ya que contienen los principales elementos (nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K)) que las plantas requieren para su crecimiento y desarrollo.
5. Subsistema de utilización. Las aplicaciones energéticas del biogás en función a su calidad (composición de gases) pueden ser térmicas o eléctricas. El biogás más impuro (con mayor cantidad de gases indeseables) se emplea como combustible en equipos comerciales diseñados para gas natural o propano, como estufas de gas, lámparas, etc., y éste ha sido el uso que tradicionalmente se le ha dado. No cabe duda, que el uso más interesante que tiene el biogás en la actualidad es para la generación de electricidad y la cogeneración, producción conjunta de calor y electricidad. El biogás con un grado medio de pureza, se puede utilizar en motores de combustión interna (motores de ciclo Otto-gasolina y motores diesel) y turbinas de gas. En el caso de las celdas de combustible se requiere que el biogás tenga un alto grado de pureza [60]. También existen aplicaciones del biogás en secadores solares.

## 2.6. Tipos de biodigestores

A lo largo del desarrollo de esta tecnología de acuerdo a la aplicación del biogás, características de la materia orgánica, niveles de descontaminación y la relación costo-beneficio se han diseñado y evaluado diversos tipos de biodigestores, los cuales se clasifican en función a diferentes criterios, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Modelo chino: Este fue concebido respetando las condiciones imperantes en su país de origen. Su diseño responde a una maximización del ahorro de material sin entrar en el cálculo de la demanda de la mano de obra. Su forma se asemeja a la de una esfera y

el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable. Se cargan en forma semicontinua realizándose una primera carga con material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente, hasta un 70 % de la capacidad, luego se sigue cargando como uno continuo [36].

- Biodigestor rígido modelo DM1 (Figura 2.4): Es un dispositivo basado en el mismo principio del modelo chino, lo que lo hace diferente es que está construido con un recipiente de polietileno de alta densidad (PEAD) color negro, al cual se le realizaron varios orificios para colocar los diferentes componentes del sistema tales como: la entrada de la materia orgánica, la salida de la materia orgánica procesada (bioabono), la salida de biogás, y dos tubos de policloruro de vinilo (PVC) para los diferentes sensores. Asimismo cuenta con un sistema de agitación manual hecho de PVC.

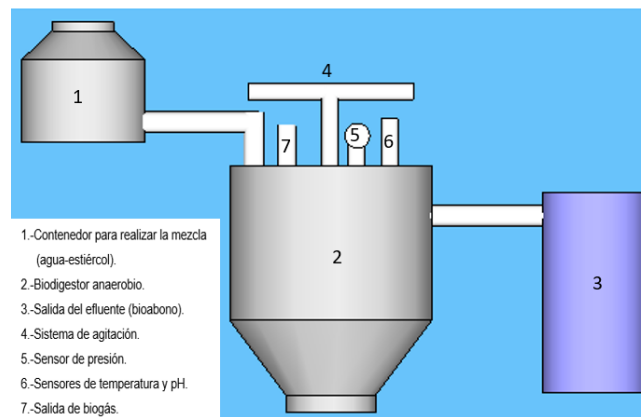


Figura 2.4: Esquema de biodigestor rígido modelo DM1.

- Modelo Hindú: Este posee una cámara de digestión de forma cilíndrica sobre la cual flota la campana gasométrica. El gas gracias al gasómetro flotante se almacena a presión constante y volumen variable. Esta presión puede ser incrementada con la adición de contrapesos. Funciona de forma continua realizándose por lo general una carga diaria o cada dos o tres días. El vaciado completo sólo se realiza en el caso de requerir alguna reparación o limpieza. Demanda un mayor gasto de materiales y la campana gasométrica es generalmente lo más caro del equipo. Su funcionamiento es muy sencillo y no presenta serios inconvenientes en el área rural [36].
- Sistema batch: Se caracterizan por una carga y vaciado total de la cámara de digestión. De uso en laboratorios y en el tratamiento de materias vegetales. Requieren para acelerar su arranque de un inóculo 20 %. Esto obliga a fin de mantener una producción de gas estable a lo largo del tiempo a poseer por lo menos tres o cuatro biodigestores de este

tipo. Son eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los de tipo continuo debido al posible tamponamiento de los conductos de alimentación y salida.

- Sistema continuo o semicontinuo: En este tipo de biodigestores el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente. De este modo el volumen en la cámara de digestión se mantiene constante. Los continuos se cargan generalmente en forma diaria, a diferencia de los semicontinuos se descargan totalmente una o dos veces por año. El tiempo de permanencia de la biomasa dentro del biodigestor estará dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de la carga diaria. La mayor parte de los biodigestores difundidos a lo largo de todo el mundo pertenecen a esta categoría y existen dentro de ella enormes variaciones sobre el mismo principio.
- Mezcla completa (Figura 2.5) En estos se busca que el substrato en fermentación dentro de la cámara se mezcle en forma total, en general diariamente. Existen diversos medios para lograr este fin, entre los que podemos mencionar la agitación de líquidos mediante bombas internas o externas al biodigestor y la reinyección de biogás dentro de la cámara produciendo un intenso burbujeo [36]. El flujo que sale del reactor tiene la misma composición que el líquido contenido en el mismo. Al reactor mezcla-completa frecuentemente se le conoce como reactor de agitación continua [continuous stirred-tank reactor (CSTR)] [43].

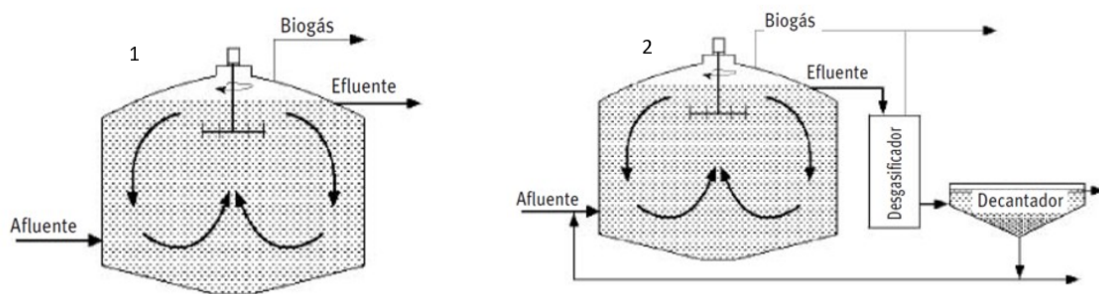


Figura 2.5: Reactor de mezcla completa sin recirculación (1) y con recirculación (2). [58]

- Mezclado parcial: En este grupo se encuentran los pequeños biodigestores rurales en los cuales los métodos de agitación son muy rudimentarios (agitadores del tipo manual o rotación de la campana gasométrica). En otros casos como los biodigestores del tipo horizontal la agitación se logra mediante la circulación del substrato dentro de la cámara

de digestión. El flujo puede ser ascendente o bien descendente, lo que dependerá de la entrada y salida del substrato.

- Contacto anaeróbico: Tanto en este como en los siguientes sistemas se ha buscado algún medio para retener la mayor cantidad de bacterias activas dentro de la cámara de digestión a fin de lograr menores tiempos de retención y consecuentemente menores volúmenes de biodigestor para tratar la misma cantidad de biomasa. En estos biodigestores la pileta de sedimentación a la salida de los mismos, da la posibilidad a las bacterias que han salido con el efluente asentarse y decantar, para luego ser reintroducidas en forma de lodo, mezclado con material de carga como inóculo. También se puede utilizar un separador de membranas que no hace otra cosa que filtrar las bacterias, proceso que se realiza mediante un bombeo externo del lodo de la parte inferior hacia la superior.
- Manto de lodos de flujo ascendente (UASB): En su interior posee separadores y mamparas estratégicamente ubicadas las que generan zonas de tranquilidad en las cuales las bacterias han conformado glomérulos (floculación) que sedimentan y así se evita que salgan con el efluente que es sacado por la parte superior de la cámara de carga (Figura 2.6).

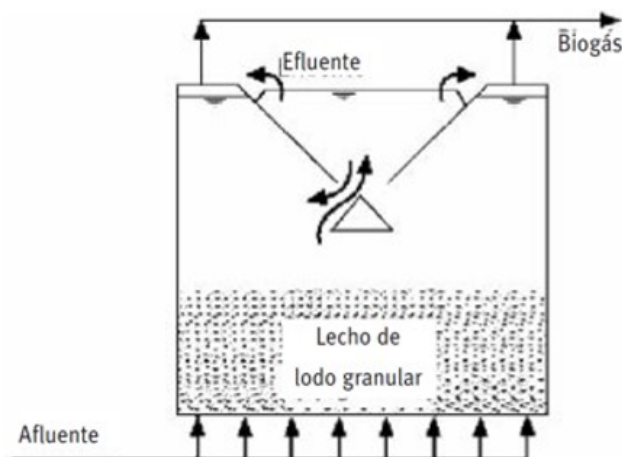


Figura 2.6: Reactor UASB.  
[58]

- Lecho fluidizado: En este tipo de reactor unas pequeñas partículas se mantienen en suspensión dentro de la cámara de digestión. Las bacterias se adhieren a estas partículas, que no son atacadas y salen con ellas, mediante el filtrado del efluente se pueden recuperar estas partículas juntamente a las bacterias y se reintroducen al biodigestor (Figura 2.7).
- Filtro Anaeróbico: Estos reactores tienen la particularidad de ser alargados, últimamen-

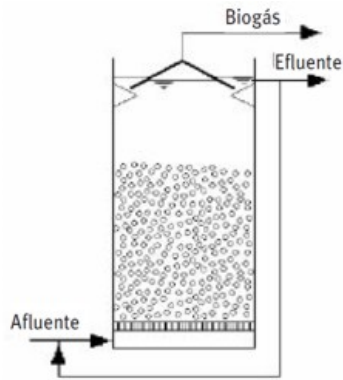


Figura 2.7: Reactor de lecho fluidizado.

[58]

te se está experimentando con filtros horizontales, pero los verticales siguen siendo más eficientes, en su interior poseen un medio fijo que puede estar constituido por cañerías reticuladas, piedra caliza, formas plásticas de gran relación superficie/volumen, etc (Figura 2.8). Sobre estos materiales no atacables se adhieren las bacterias y así se evita su pérdida, que disminuye notablemente los tiempos de retención. Existen dos variantes de flujo ascendente y descendente. Tanto este biodigestor como los dos anteriores admiten tiempos de retención muy bajos (0.5 a 3 días) con muy altos niveles de eficiencia (se han llegado valores de producción de biogás de 7 veces el volumen del reactor por día).

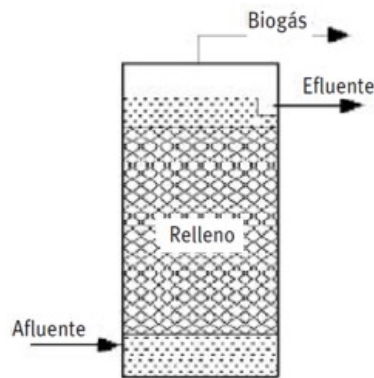


Figura 2.8: Filtro anaerobio.

[58]

- Una etapa: Todos los tipos de biodigestores vistos hasta el momento se agrupan en esta categoría debido a que todas las etapas de la digestión anaerobia se cumplen en una única cámara, en la cual todas las bacterias están sometidas a las mismas condiciones.
- Dos etapas: En estos se han dividido en dos cámaras de digestión separadas, donde en la primera se desarrolla la etapa acidogénica y en la segunda la acética y la metanogénica. Esto permite optimizar las condiciones de desarrollo de cada tipo de bacteria y extraer los

sólidos indigeribles antes que pasen a la etapa metanogénica. Estos biodigestores no han sobrepasado la etapa experimental y de plantas piloto, aún resta solucionar una serie de problemas a gran escala para llegar a una amplia difusión. Más del 80 % de las plantas de biogás difundidas en el mundo pertenecen a dos tipos de diseño, cuyos nombres derivan de los países en los cuales se realizaron los primeros modelos y posteriormente se les dio una difusión masiva [36].

## 2.7. Parámetros que influyen en la eficiencia de la producción de biogás

Existen diferentes factores que intervienen en el proceso de la producción de biogás, algunos de ellos pueden ser controlados (por ejemplo la temperatura interna, pH, agitación, etc.) para que el proceso se mantenga estable, y otros vienen dados por la naturaleza (como el tipo de materia orgánica, temperatura ambiente, etc.). A continuación se mencionan los siguientes:

- Parámetros que caracterizan el proceso: describen el estado general del proceso; por ejemplo si disminuye la producción de biogás o el valor del pH son signos de inestabilidad.
  - Cantidad y composición del sustrato
  - Cantidad y composición de biogás
  - Temperatura de fermentación
  - Sólidos totales/materia seca
  - Valor de pH
  - Presión
  - Demanda química de oxígeno (DQO)
- Indicadores tempranos de procesos inestables: pueden indicar con antelación si un proceso de desequilibrio es inminente.
  - Ácidos grasos volátiles (AGV)
  - Relación de alcalinidad (Análisis FOS/TAC)
- Parámetros variables: pueden ser influenciados por el operador del biodigestor.
  - Velocidad de carga orgánica
  - Tiempo de retención hidráulica

### **2.7.1. Tipo de materia orgánica**

Los diferentes estados físicos de la biomasa determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Su composición química y física establece el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar, para la mayoría de los procesos de conversión energética es necesario un contenido de humedad mayor que 30 %. Mientras que su poder calorífico determina la energía disponible en la biomasa, asimismo existen diversos tipos de biomasa que puede ser aprovechada para la producción de biogás, entre ellos se mencionan los siguientes.

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos que pueden ser usados como fuente de energía; los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna y porcina) y vegetales tales como cáscaras y pulpa, cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos, con un alto contenido de azúcares y carbohidratos.

Los desechos urbanos representan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras que si no se recogen y procesan generan grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas. Por otra parte, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles que contribuyen a aumentar el efecto invernadero si se liberan.

Los desechos agrícolas representan cantidades considerables de desechos o rastrojos. Se estima que los desechos de campo son más del 60 %, ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el maíz, el café y la caña de azúcar [67].

Los desechos del sector pecuario presentan una excelente oportunidad para ser aprovechados debido a su gran producción, principalmente de estiércol bovino y porcino.

### **2.7.2. Temperatura**

Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4 a 5 °C [36]. En general, cuanto mayor sea la temperatura, mayor es la velocidad de la digestión anaeróbica. Sin embargo, se debe notar que la relación no es lineal, y que la tasa declinaría por arriba de los 65-70 °C, ya que la población microbiana empezaría a morir. Esta tasa continuaría disminuyendo hasta los 90 °C, donde la población estaría mayormente muerta y por lo tanto la tasa sería mínima [55].



Los biodigestores pueden operarse en tres intervalos de temperatura. Uno psicrófilico (por debajo de 25 °C), mesófilico (25-45 °C) y otro termófilico (45-55 °C) [54]. Casi todos los digestores, funcionan en forma óptima dentro de los límites de temperaturas mesófilas entre 35-37 °C.

Para el control de la temperatura, se deben instalar sensores al interior del biodigestor. Los sensores, deben ubicarse estratégicamente, de tal forma, que se obtengan mediciones representativas del sustrato. Las especificaciones de los sensores, deben ser para aguas agresivas. Los sensores, siempre deben estar sumergidos en el agua. Los conectores de los sensores, no deben estar en contacto con el agua, para que no sufran daños permanentes. No se deben instalar sensores domésticos o portátiles, que no sean fabricados para trabajar en medios agresivos [26].

El proceso de digestión anaerobio no se afecta por el incremento de temperatura en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento súbito en unos pocos grados podría retardar la producción de metano, sin afectar la actividad de las bacterias acidificantes, permitiendo excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor [57].

### **2.7.3. Agitación**

Lo que se busca al utilizar un sistema de agitación es homogenizar la temperatura en el interior del biodigestor, mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana, evitar que se formen natas dentro del biodigestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar que se formen espacios muertos sin actividad biológica y exceso de sedimentación de sólidos. Los sistemas de agitación pueden ser de eje horizontal o vertical, de propela ajustable, hidráulico, de propela con brazo giratorio, inyección de gas, etc.

### **2.7.4. Acidez (pH)**

El proceso de acidificación y metanogénesis requieren diferentes niveles de pH para el óptimo control del proceso. Las bacterias acidogénicas prefieren un nivel de pH entre 5.5 y 6.5 mientras que las metanogénicas prefieren un pH de 7.8-8.2. En un ambiente donde ambas existen, el intervalo óptimo de pH es 6.8-7.4. El pH afecta la funcionalidad de los microorganismos.

Los productos de la fase de la hidrólisis, son ácidos orgánicos por lo que el pH es más bajo. Si el pH es demasiado bajo, los metanogénos no pueden convertir los ácidos orgánicos en metano y el sistema falla.

Los ácidos orgánicos producidos, son por lo tanto también vistos como sustancias inhibido-

ras. La mejor manera para controlar es monitoreando la materia orgánica y asegurarse de que es lo suficientemente alcalina, o no hidrolizada con demasiada facilidad, a fin de causar una caída en el pH [55].

Cuando el pH está cerca de 7, la mezcla establece su propio balance, y esta no presenta cambios sustanciales, aunque se le añadan productos con pHs alcalinos o ácidos. Si esta capacidad de autorregulación de la mezcla se destruye, el pH cae y el proceso interrumpe su adecuada actividad llegando en ocasiones a “vinagrarse”, produciendo olores desagradables, reduciendo la calidad de los sólidos, y líquidos, y cesando la producción de metano. Por todo lo anterior el pH es un excelente indicador del buen funcionamiento del proceso de digestión [18].

### **2.7.5. Tamaño de partícula**

Las partículas más pequeñas incrementan la productividad del sistema, a menudo los desechos requieren de maceración para llegar al tamaño ideal.

### **2.7.6. Velocidad de carga orgánica**

Ésta necesita ser optimizada para la máxima producción de biogás, en los casos en que la tasa de carga orgánica es más alta de lo normal, el proceso de la digestión se convierte en desequilibrado debido a la producción excesiva de ácidos volátiles en concentraciones inhibitorias. La producción de dióxido de carbono en estas condiciones a menudo causa la formación de espuma en el digester y contribuye a problemas de funcionamiento. Si la tasa de carga orgánica es demasiado alta, el sistema puede sufrir un lavado, lo cual significa que la población microbiana sale del sistema antes de que pueda degradar los residuos [55].

### **2.7.7. Tiempo de retención hidráulica (TRH)**

Es el período necesario para completar la descomposición de la materia orgánica, el tiempo puede ser corto, por ejemplo para los sustratos de fácil biodegradación que no contienen grandes cantidades de lignina, mientras que en el caso de los sustratos con una composición más compleja el TRH puede ser más largo [54].

### **2.7.8. Contenido de sólidos totales**

La concentración total de sólidos a menudo dicta el tipo de sistemas de reactores que sean apropiados, que van desde tipo laguna, sistemas de bajo contenido de sólidos totales (fracción

de masa 1-5 %) a sistemas tipo batch de alto contenido de sólidos totales (11-15 % de fracción de masa). Las bacterias consumen el sustrato orgánico disponible en forma disuelta, por lo que la producción de biogás y el contenido de agua de la materia orgánica inicial son interdependientes. Cuando el contenido de agua está por debajo de la fracción de masa del 20 %, la producción de biogás es limitado significativamente, mientras que con el aumento de contenido de agua, la producción de biogás es mayor, alcanzando su nivel óptimo en el 91 % y 98 % de fracción de masa de agua.

### **2.7.9. Configuración del reactor**

El rendimiento de la digestión anaerobia en el digestor de biogás es basado en la capacidad para mantener una alta relación de tiempo de residencia sólida durante el tiempo de residencia hidráulica, lo que afectará la calidad del efluente. Estos son una función de las geometrías de los distintos componentes del digestor.

### **2.7.10. Inhibición y toxicidad**

Los microorganismos responsables de la digestión anaerobia pueden ser inhibidos por sustancias presentes en el influente (materia orgánica a degradar), tales como componentes halogenados, metales pesados y cianuro, pero también pueden ser inhibidos por los subproductos metabólicos como el amonio, los ácidos grasos volátiles y el sulfuro de sustancias tóxicas.

### **2.7.11. Relación carbono/nitrógeno (C:N)**

La composición de los desechos es importante. El exceso de nitrógeno vuelve al amonio en inhibidor, y demasiado carbono causa que la hidrólisis se lleve a cabo rápidamente y esto hace que el pH caiga. La relación C:N óptima está entre 20-30. En las operaciones rurales, la materia orgánica es típicamente homogénea.

Las principales fuentes de energía para las bacterias dentro del biodigestor son el carbono y nitrógeno presentes en la materia prima. Las bacterias metanogénicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, y por lo tanto la proporción de carbono y nitrógeno (C:N) de la materia prima es óptima en el intervalo de 20:1 a 30:1. Cuando la relación es superior a 35:1, la digestión será lenta debido a que las bacterias se reproducirán lentamente por la falta de nitrógeno. En este caso, la orina de los animales en dosis bajas puede ser añadida al biodigestor [55].

Por otro lado, con una proporción de 8:1 o menos, se generan altas concentraciones de amoníaco, el que es tóxico para las bacterias. En este caso, fuentes de carbono tales como

residuos verdes o periódico de desecho podrán ser añadidos a la mezcla de materia prima para aumentar la relación de C:N [25].

### **2.7.12. Ácidos grasos volátiles (AGV)**

Son ácidos orgánicos volátiles de cadena corta tales como ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico y ácido valérico o isómeros ramificados de los mismos (ácido isobutírico, etc.), por lo tanto son metabolitos intermedios en el proceso de digestión anaerobia que se producen durante la acidogénesis y son precursores de metano. Como consecuencia la metanogénesis (transformación biológica de metano) se inhibe si a menudo estos se acumulan.

### **2.7.13. Relación de alcalinidad (Análisis FOS/TAC)**

Es un método desarrollado por el Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL), FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir ácidos grasos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/l y TAC significa Totales Anorganisches, esto es, carbonato inorgánico total, se mide en mg CaCO<sub>3</sub>/l.

La relación entre los ácidos orgánicos volátiles y la capacidad de compensación alcalina es una medida del riesgo de acidificación de una planta de biogás, lo que permite detectar a tiempo los problemas del proceso y se pueden tomar contramedidas inmediatamente (Tabla 3.2) [45].

La capacidad de amortiguación es por lo tanto proporcional a la concentración de carbonato. La alcalinidad es un método más fiable de medición de desequilibrio en un digestor que las mediciones directas de pH. Cuando existe una acumulación de ácidos grasos de cadena corta la capacidad de amortiguación se reduce de manera significativa antes de que el pH disminuya [71].

### **2.7.14. Presión dentro del biodigestor**

Si se excede la presión de operación en un biodigestor existe el peligro de que se reviente o se zafen los amarres de las membranas de cubierta, en caso de que sea un biodigestor flexible de geomembrana. De igual manera si se sobrepasa la presión nominal de las tuberías, estas pueden dañarse o soltarse de los accesorios. Los biodigestores con membrana flexibles trabajan con presiones muy bajas del orden de 2-4 mbar. Solo los de cubierta cerrada de hormigón armada o acero resisten presiones mayores [27].

## 2.8. Conclusiones

Las energías renovables tienen su origen en la energía solar, la cual aún cuenta con un tiempo de vida estimado de 5 mil millones de años, es decir, el suficiente tiempo para aprovecharlas y satisfacer necesidades presentes. Como se pudo observar a lo largo de este capítulo el concepto de la bioenergía, engloba ampliamente diferentes formas de aprovechar el potencial de la biomasa y obtener algún tipo de biocombustible como energía útil, todos y cada uno de estos procesos tienen su grado de complejidad.

El biogás se produce por medio del proceso de digestión anaerobia en biodigestores, por lo tanto, al operar estos dispositivos es importante identificar claramente los factores que deben ser considerados para mantener la estabilidad y eficiencia y así obtener una cantidad y calidad favorable de biocombustible. La transformación de la biomasa de los residuos animales en energía útil presenta grandes ventajas en distintos ámbitos tales como ambiental, social, económico y principalmente en la salud.

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Introducción

En este capítulo se describe el uso de los procedimientos, métodos e instrumentos de medición que se tomaron en cuenta para realizar la evaluación del comportamiento operacional de un biodigestor rígido modelo DM1. En la literatura no existe una metodología que describa la forma y el equipo o instrumentos de medición para evaluar en general todos los parámetros de los biodigestores, sino que cada monitoreo se realiza en función del enfoque de la investigación, equipo de medición disponible, características físicas del biodigestor (volumen, material de construcción, etc.) y lugar de instalación. La mayoría de las investigaciones están enfocadas a monitorear algunas características de biodigestores a nivel laboratorio lo que se aleja de la realidad de un proceso a escala rural.

El monitoreo es necesario para conocer las características de operación del biodigestor y analizar los diferentes parámetros, lo que facilitará en caso de presentarse alguna falla durante el proceso, determinar la causa de la alteración y tomar la decisión correspondiente para corregirla.

### 3.2. Verificación y puesta a punto del sistema de biodigestión anaerobia

Primero se realizará la inspección de las condiciones en las que se encuentra el biodigestor para determinar si es necesaria la limpieza, sellado y/o cambio de piezas. Luego, si se detecta que el sistema está en condiciones desfavorables para llevar a cabo el monitoreo, se realizará la limpieza del mismo retirando desechos orgánicos provenientes de experimentos anteriores, para

lo cual será necesario utilizar una bomba sumergible para extraer los lodos; posteriormente se sellará la tapa con silicón sellador de altas temperaturas el cual puede resistir a las condiciones de temperatura que estará expuesto y para verificar que quede perfectamente sellado, se introducirá aire con un compresor y con agua jabonosa verificarán las posibles fugas.

También se comprobará que el recorrido del aire sea completo, es decir, que al mismo tiempo que se introduzca aire al reactor (biodigestor) asimismo llegue hasta el sistema de almacenamiento (bolsa de geomembrana) sin que exista alguna obstrucción o escape por fugas durante el recorrido.

Además, se llenará de aire la bolsa de geomembrana esto con el fin de detectar con antelación las posibles fugas y así evitar futuras pérdidas de biogás, estas fugas se sellaran aplicando la técnica de termofusión.

Finalmente se rehabilitaran los filtros para la reducción del ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) contenido en el biogás, para esto se limpiaran los dos filtros que ya se tienen construidos, retirando la viruta de hierro antigua, posteriormente se realizará la oxidación de viruta de hierro nueva utilizando el procedimiento descrito por [22] el cual es el siguiente:

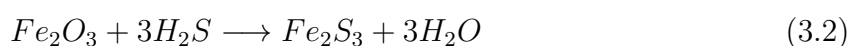
1. Primero se lavaran las virutas con detergente para eliminar la grasa y otras suciedades que puedan traer, y se dejaran secar al aire libre.
2. Luego se sumergirán las virutas limpias y secas en una solución de ácido clorhídrico ( $HCl$ ) a 5 % durante 5-10 minutos, se extraerán y se dejaran secar al aire libre.
3. Por último se sumergirán en una solución de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) a 5 % durante 5-10 minutos posteriormente se dejaran secar al aire libre.

Entonces las virutas se convertirán en óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ), que sí reacciona rápidamente con el  $H_2S$ , como se demuestra en las siguientes reacciones (3.1 y 3.2).

Reacción lenta



Reacción rápida



El límite de absorción del  $\text{H}_2\text{S}$  en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es de 56 %.

4. Ya que la viruta de hierro se convirtió en óxido de hierro, se llenarán los filtros con la viruta oxidada necesaria.

La literatura es contradictoria en cuanto a la cantidad permisible de  $\text{H}_2\text{S}$  en el biogás para operar motores sin que sufran daños. Según el criterio de los especialistas del Instituto de Energía de Hanoi, no debe sobrepasar las 50 ppm [22].

### **3.3. Llenado del biodigestor**

Para realizar el llenado del biodigestor, se tendrá que determinar el lugar de recolección de estiércol, el cual debe cumplir las siguientes características:

- Cercanía al Centro de Desarrollo y Evaluación de Biodigestores para que el costo de transporte sea el mínimo posible.
- Cantidad suficiente de estiércol.
- Disponibilidad de las personas para proporcionar la materia prima.

Antes de llenar por primera vez el biodigestor se deberá asegurar que la válvula del tubo de entrada este cerrada y la del tubo de salida este abierta.

Teniendo la materia orgánica en el lugar donde se encuentra el biodigestor se retirarán los materiales indeseables como piedras, materiales inorgánicos, entre otros, que muchas veces están contenidos en el estiércol.

Luego se realizará la mezcla agua/estiércol en el recipiente que denominamos subsistema de pre tratamiento y adecuación de la materia orgánica, para esto se deberá pesar previamente el estiércol y el agua cada uno por separado, para tener un control de las cantidades a utilizar, además de deshacer los grandes grumos para evitar la obstrucción de la tubería.

Después que se tiene una mezcla homogénea se tomarán las muestras necesarias para la determinación de sólidos, demanda química de oxígeno (DQO) y pH, posteriormente se abrirá la válvula de entrada para que fluya hacia el interior del biodigestor y así sucesivamente se llenará poco a poco hasta alcanzar el 75-85 % del volumen total, el espacio sobrante quedará



para el almacenamiento de biogás. Cuando la mezcla comience a salir por el tubo de salida, se considera que el biodigestor se llenó alrededor de un 70 % de su volumen por lo que se cierran las válvulas de salida y se le agregarán alrededor de 20 L más de mezcla para lograr que el tubo (de salida) quede completamente lleno.

Finalmente se cerrará la válvula de entrada para crear el ambiente anaerobio que las bacterias necesitan para su crecimiento y desarrollo.

Luego de realizar este procedimiento se iniciará la evaluación simultánea de la temperatura, pH, composición de biogás, ácidos grasos volátiles totales (AGV), presión, relación de alcalinidad (FOS/TAC), etc.

Después de 14-20 días deberá comenzar la producción de biogás, esto se podrá comprobar ya sea con una prueba de combustión y/o con el analizador de gases, entonces se iniciará la cuantificación del volumen producido diariamente por el método de desplazamiento de agua.

### **3.4. Evaluación de los parámetros operacionales del biodigestor**

En esta etapa los parámetros que se evaluarán son los siguientes: cantidad y tipo de sustrato, composición y cantidad de biogás, temperatura de fermentación, temperatura del medio ambiente y del suelo, sólidos totales (materia orgánica seca), sólidos volátiles (materia orgánica que se convertirá en biogás), valor de pH, AGV, análisis FOS/TAC, DQO y presión, los cuales se consideran importantes, ya que podrán aportar información del comportamiento operacional del biodigestor. Para obtener las mediciones de cada uno de estos parámetros será necesario utilizar los siguientes métodos, materiales e instrumentos de medición:

#### **3.4.1. Determinación de sólidos**

Se utilizará el procedimiento establecido por la norma NMX-AA-034-SCFI-2001 [1].

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.

Deben tomarse un mínimo de 500 ml de muestra en envases de polietileno y taparse inmediatamente después de la colecta, no se requiere de ningún tratamiento específico en campo, además la muestra debe preservarse a 4 °C hasta su análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días. Sin embargo, se recomienda realizar el análisis dentro de las 24 h posteriores a su colecta. Las muestras deben estar a temperatura ambiente al momento del análisis.

### PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES

1. Las cápsulas se introducirán a la mufla (Figura 3.1b) a una temperatura de 550 °C ± 50 °C, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlas a la estufa (Figura 3.1a) a 103-105 °C aproximadamente 20 min.
2. Después se sacarán y enfriarán a temperatura ambiente dentro de un desecador. Luego se pesarán (Figura 3.1c) las cápsulas y se registrarán los datos.
3. Se repetirá el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtendrá hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0.5 mg. Registrar como peso G.
4. Se sacarán las muestras del sistema de refrigeración para que alcancen la temperatura ambiente. Se agitarán las muestras para asegurar la homogenización de la muestra.
5. Se deberá tomar una cantidad de muestra, generalmente 100 ml de muestra es un volumen adecuado.
6. Luego se transferirá la muestra a la cápsula de porcelana que previamente ha sido puesta a peso constante.
7. Se llevará a sequedad la muestra en la estufa a 103-105 °C.
8. Se enfriará hasta temperatura ambiente en un desecador y se determinará su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G1.
9. Finalmente se calculará el contenido de sólidos totales de la muestra utilizando la siguiente fórmula:

$$ST = (G1 - G) * 1000/V \quad (3.3)$$

donde

$ST$  = Sólidos totales en mg.

$G1$  = Peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación en mg.

$G$  = Peso de la cápsula vacía en mg a peso constante.

$V$  = Volumen de la muestra en mL.

#### PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES

1. Primero se introducirá la cápsula conteniendo el residuo a la mufla a 550 °C durante 15 minutos-20 minutos, después se transferirá la cápsula, se enfriará a temperatura ambiente en desecador y se determinará su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso  $G2$ .
2. Cuando se determinen muestras por duplicado o triplicado, los resultados como máximo pueden tener una variación del 5 % del promedio de los resultados.

$$SVT = (G1 - G2) * 1000/V \quad (3.4)$$

donde

$SVT$  = Materia orgánica total, en mg.

$G1$  = Peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación en mg.

$G2$  = Peso de la cápsula con el residuo, después de la calcinación en mg.

$V$  = Volumen de la muestra en mL.



(a) Horno Binder



(b) Mufla Felisa



(c) Balanza analítica

Figura 3.1: Equipos de medición para determinación de sólidos.

### 3.4.2. Medición de la demanda química de oxígeno (DQO)

Para esto se utilizará el método de reflujo cerrado y el método espectrofotométrico descritos en la norma NMX-AA-030-SCFI-2001 [23].

Primero se realizarán cada una de las disoluciones que se explican a continuación:

Disolución estándar de biftalato de potasio ( $1 \text{ mL} = 1 \text{ mg}$  de DQO). Deshacer los grumos y secar el biftalato de potasio a  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pesar con precisión  $0,851 \text{ g}$  de biftalato de potasio, disolver en agua y aforar a  $1 \text{ L}$ . Es estable hasta por 3 meses cuando se mantiene en refrigeración y si no se observa crecimiento biológico.

Disolución de sulfato de plata en ácido sulfúrico. Pesar con precisión  $15 \text{ g}$  de sulfato de plata y disolver en  $1 \text{ L}$  de ácido sulfúrico concentrado. El sulfato de plata requiere un tiempo aproximado de dos días para su completa disolución. La disolución formada debe mantenerse en la obscuridad para evitar su descomposición.

Disolución de digestión A (alta concentración). Pesar con precisión  $10,216 \text{ g}$  de dicromato de potasio, previamente secado a  $103 \text{ }^\circ\text{C}$  por  $2 \text{ h}$ , y añadirlos a  $500 \text{ ml}$  de agua, adicionar  $167 \text{ ml}$  de ácido sulfúrico concentrada y aproximadamente  $33,3 \text{ g}$  de sulfato mercúrico. Disolver y enfriar a temperatura ambiente. Aforar a  $1 \text{ L}$  con agua.

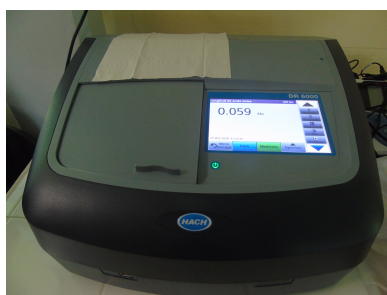
La muestra se deberá analizar inmediatamente después de su toma, en caso contrario debe conservarse en refrigeración a  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ , además de la adición de ácido sulfúrico hasta  $\text{pH} < 2$ . El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 28 días.

## PROCEDIMIENTO

1. Precalentar a 150 °C el digestor DQO (Figura 3.2c).
2. Colocar en los tubos de reacción (Figura 3.2a) 1.5 ml de la disolución de digestión A o B.
3. Tomar cuidadosamente 2.5 ml de muestra previamente homogenizada dentro de los tubos de reacción.
  - Cerrar inmediatamente para evitar que se escapen los vapores, asegurarse de que están herméticamente cerrados.
  - Suavemente invertir los tubos varias veces, destapando después de cada inversión para liberar presión.
4. Añadir cuidadosamente 3.5 ml de la disolución de digestión respectiva.
5. Colocar 2.5 ml de agua en un tubo para la determinación del blanco de reactivos
6. Colocar todos los tubos en el digestor previamente calentado a 150 °C y refluxar por 2 horas.
7. Retirar los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente.
8. Medir la absorbancia en el espectrofotómetro (Figura 3.2b) previamente calibrado. Para aguas que contengan una DQO baja (5 mg/L a 75 mg/L), utilizar la disolución de digestión B. Si el valor de la DQO determinado es más alto que 75 mg/L después de usar estos reactivos, reanalizar la muestra, utilizando la disolución A.



(a) Digestor DQO



(b) Espectrofotómetro



(c) Tubos de cultivo

Figura 3.2: Equipos de medición para DQO.

### 3.4.3. Método de desplazamiento de agua para la cuantificación del volumen de biogás

Para medir la producción de biogás existen diversos equipos (medidor de gas comercial de diafragma de baja presión, flujómetros, caudalímetros, etc.) en este caso se cuenta con un flujo-metro para biogás, pero este aparato sólo mide volúmenes grandes. Por esta razón se utilizará el método de desplazamiento de agua, para esto se diseñará un cuantificador que medirá el volumen de biogás (Figura 3.3) en el *software Sketchup 2016*.

Éste se construirá con material de bajo costo como lo es el policloruro de vinilo (PVC), constará de un tubo de 1 m y otro de 0.5 m, ambos de 6" de diámetro conectados entre sí por medio de una válvula, también contará con dos mangueras transparentes para utilizarlas como nivel de referencia y visualización de las cantidades de biogás. Luego de ser construido se deberá verificar que no haya fugas, finalmente se adaptará al sistema de biodigestión anaerobia para realizar las mediciones.

El método de desplazamiento de agua consiste en la medición del volumen de biogás basado en el mismo principio de un manómetro en U (la diferencia de alturas), es decir, se llenarán de agua los dos tubos al mismo nivel, el cual se podrá visualizar con las dos mangueras, cuando inicie la generación de biogás el nivel de agua empezará a subir en una manguera y realizando los cálculos correspondientes se determinará el volumen de agua que se desplazará a lo largo del tiempo, el cual se podrá decir que es el mismo que ocupa el biogás. El cuantificador tendrá un nivel de error razonable (menor al 2%) [52].

Normalmente se utiliza la fórmula del volumen de un cilindro ( $V=\pi r^2 h$ ), donde: V=volumen del biogás, r=radio y h= altura (altura de agua desplazada), pero para facilitar la obtención de las mediciones del volumen no se utilizará esta fórmula, sino que se llenará de agua la manguera con un vaso de precipitado y se marcará con una línea cada 200 ml. Cabe mencionar que una disminución drástica del 10 % indica inestabilidad en el proceso.

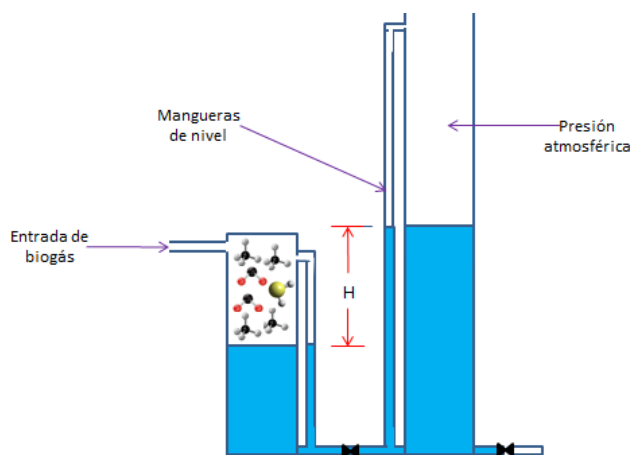


Figura 3.3: Esquema de cuantificador de biogás.

### 3.4.4. Monitoreo de la composición del biogás

Como ya se ha mencionado para algunas aplicaciones del biogás se requiere que éste contenga el mayor porcentaje posible de metano. La composición de la mezcla de gases se determinará utilizando un analizador de gases portátil *Multitec 540* (Figura 3.4), este equipo medirá simultáneamente el nivel de concentración de cinco gases, ya que incorpora sensores infrarrojos para la medición de metano y dióxido de carbono y cuenta sensores electroquímicos para los otros gases (Tabla 3.1).

Este analizador se conectará a una válvula por medio de una manguera flexible que esta acoplada con un filtro de humedad y un adaptador que ya están incluidos en los accesorios del equipo, la válvula permitirá el control de la entrada y salida del biogás y se encontrará lo más cercana posible al reactor para tomar las mediciones correspondientes, las cuales se realizarán diariamente.

Tabla 3.1: Características de la medición del biogás.

Tipo de gas	Intervalo de medición	Tipo de sensor
Metano	0-100 % vol.	Infrarrojo
Dióxido de carbono	0-100 % vol.	Infrarrojo
Oxígeno	0-25 % vol.	Electroquímico
Sulfuro de hidrógeno	0-2000 ppm	Electroquímico
Monóxido de carbono	0-500 ppm	Electroquímico



Figura 3.4: Analizador de gases

### 3.4.5. Monitoreo de la temperatura

Se utilizarán tres termopares tipo K (Figura 3.5a) con un error de medición de  $\pm 0.75\%$ , para medir la temperatura de la materia orgánica dentro del biodigestor, así como también la temperatura ambiente y la del suelo, y para la adquisición de datos un *datalogger* USB-TEMP-AI (Figura 3.5b) el cual irá conectado por medio del cable USB a una laptop para la visualización de las gráficas.

Para analizar el comportamiento de la temperatura en función al sistema de agitación, se realizará la medición de la temperatura en tres puntos: en la superficie, en el medio y en el fondo del sustrato (estiércol de ganado), es decir, a 0, 50 y 100 cm de profundidad; esta medición servirá para analizar el grado de homogenización y los cambios de temperatura durante el día.

Para obtener estas mediciones, se introducirán 3 termopares dentro de un tubo de  $\frac{1}{2}$ " de Polícloruro de vinilo clorado (CPVC) en puntos estratégicos dentro del biodigestor y otros 3 termopares en otro tubo de CPVC para medir la temperatura del suelo a las mismas profundidades que en el biodigestor, esto con el fin de determinar si la temperatura dentro del biodigestor es causada por la temperatura ambiente o si la temperatura del suelo también tiene influencia y analizar las transferencias de energía por el mecanismo calor, entre el suelo y el reactor. Para obtener las mediciones de la temperatura del suelo se abrirá un hueco de aproximadamente 1 m de profundidad en la parte lateral izquierda del biodigestor, en cual se introducirá un tubo de PVC y en él los sensores.



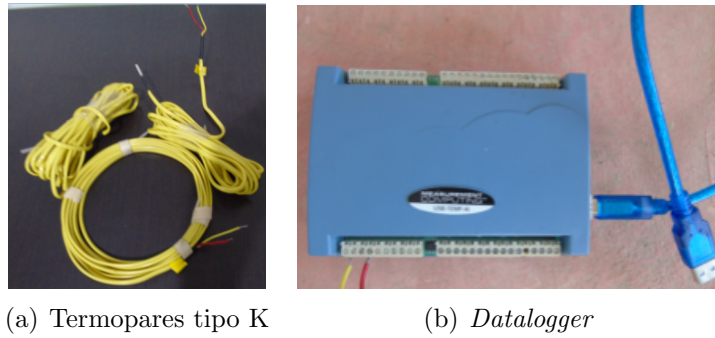


Figura 3.5: Instrumentos de medición para monitorear la temperatura.

### 3.4.6. Monitoreo de la presión

Es de vital importancia medir la presión dentro del biodigestor, ya que si no se detecta una sobrepresión del mismo puede llegar a sufrir daños en la estructura o en las tuberías, incluso podría llegar a reventar el sistema por una acumulación excesiva de gas en el interior. Para este monitoreo se utilizarán manómetros analógicos (Figura 3.6) de baja presión, fabricación exterior en acero al carbón (terminado negro mate), ventana de policarbonato. Interiores en bronce, elemento de medición tipo diafragma. Diámetro de conexión  $\frac{1}{4}$ " NPT, conexión interior 2.5 pulgadas y con un intervalo de medición de 0-3 psi, con una precisión de  $\pm 1.5\%$ . Este manómetro será instalado en un extremo de la parte superior del reactor, donde se encontrará el tubo que se adecuará para dicho fin. Las lecturas se tomarán diariamente.



Figura 3.6: Manómetro.

### 3.4.7. Monitoreo del pH

Para garantizar la vida de las bacterias se necesita un pH relativamente neutro, por tal razón es necesario su constante monitoreo, además que es un indicador de alguna inestabilidad durante el proceso.

Se utilizará un medidor de pH previamente calibrado de alta precisión marca Bante 920 equipado con pantalla LCD, con una exactitud de medición de  $\pm 0.002$  (Figura 3.7), las muestras se tomarán con un tubo de  $\frac{1}{2}$ " de CPVC, el cual se introducirá en un tubo de  $\frac{1}{2}$ " de PVC que estará a una profundidad de 0.8 m aproximadamente de tal manera que éste quede inmerso en el sustrato para evitar que al tomar la muestra el biogás salga.

Las muestras se tomarán diariamente en un vaso de precipitado con un volumen de 50 ml cada una, de modo que el electrodo quede sumergido por completo en el sustrato y así se obtendrá una medida correcta, la medición se repetirá 3 veces por cada muestreo, es decir, cada día se tomarán 3 muestras, obteniendo 3 valores diferentes y se tomará como valor real el promedio de los 3 valores.

**Importante:** la muestra debe ser previamente filtrada para evitar saturación de sólidos en el electrodo.

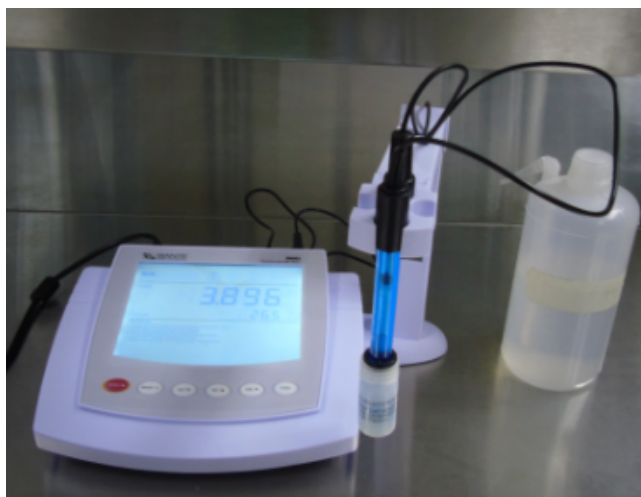


Figura 3.7: Medidor para pH

### 3.4.8. Método de valoración para la determinación de ácidos grasos volátiles (AGV)

Existen diversos métodos para determinar los AGV tales como destilación de vapor, métodos colorimétricos, cromatográficos o volumétricos, pero estos son muy costosos y difíciles de llevar a cabo [24], por lo que se utilizará el método de valoración.

En este método la muestra tiene que estar libre de sólidos en suspensión, lo cual se consigue mediante el filtrado de la muestra a través de un filtro de membrana de 0.45 micras. Se recomienda este método porque es barato, robusto y rápido de realizar, los VFA se calcularán con la siguiente fórmula (3.5) [44]. Para realizar la valoración se utilizará una bureta marca Labessa de 25 ml (Figura 3.8a), un soporte universal (Figura 3.8a), un pH-metro (Figura 3.7), agua destilada y ácido sulfúrico a 0.1N (Figura 3.8b).

$$\begin{aligned} TotalVFA [mgL^{-1}] = & [131,340 * (V_{pH_{4,0}} - V_{pH_{5,0}}) * N_{H_2SO_4} / V_{sample}] \\ & [3,08 * V_{pH_{4,3}} * N_{H_2SO_4} / V_{sample} * 1,000] - 10,9 \end{aligned} \quad (3.5)$$

donde

$V_{pH_{4,0}}$  = Volumen de ácido añadido hasta pH4.0 en ml.

$V_{pH_{4,3}}$  = Volumen de ácido añadido hasta pH4.3 en ml.

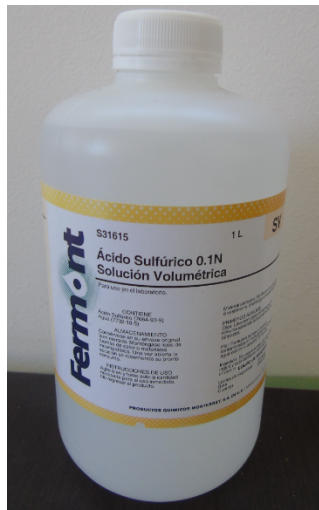
$V_{pH_{5,0}}$  = Volumen de ácido añadido hasta pH5.0 en ml.

$V_{sample}$  = Volumen de la muestra de titulación (se recomiendan 20 ml).

$N_{H_2SO_4}$  = Normalidad del ácido utilizado (0.1 en caso de 0.05 mol/l de ácido sulfúrico).



(a) Bureta y soporte universal



(b) Ácido

Figura 3.8: Materiales para el método de valoración

### 3.4.9. Relación de alcalinidad (Análisis FOS/TAC)

Realización de una medida FOS/TAC

1. Tomar una medida representativa del sustrato de fermentación.
2. Eliminar todo componente grueso de la muestra. Es crucial que la preparación de la muestra (filtro, colador de té, colador de cocina o centrifuga) se realice de la misma manera.
3. Tomar 20 mL de sustrato y, si fuera necesario, llenar de agua destilada.
4. Colocar la muestra sobre un agitador magnético y homogenizarla continuamente durante el proceso de valoración.
5. Valoración con 0.1 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hasta pH 5; anótese el volumen (ml) de ácido agregado.
6. Valoración con 0.1 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hasta pH 4.4; anótese el volumen (ml) de ácido agregado.
7. Calcular el FOS/TAC mediante la fórmula empírica (3.6).

Especificaciones FAL

- Cantidad de sustrato: 20 m
- Ácido sulfúrico: 0.1 N (0.05 mol/l)

Fórmula:

$$FOS/TAC = [(B * 1,66) - 0,15] * 500/A * 250 \quad (3.6)$$

[68]

Dónde:

$A$  = volumen de ácido añadido hasta pH 5 en ml.

$B$  = volumen de ácido añadido desde pH 5 hasta pH 4.4 en ml.

**Importante:** Si la cantidad de sustrato o la concentración de ácido no son las de arriba indicadas, debe modificarse la fórmula como corresponda.

Tabla 3.2: Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC.

FOS/TAC	Antecedentes	Medida
>0.6	Excesiva sobrealimentación de la biomasa	Interrumpir la adición de biomasa
0.5-0.6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0.4-0.5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0.3-0.4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0.2-0.3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
<0.2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa

[45]

### 3.4.10. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Como se ha encontrado en la literatura el tiempo de retención se calcula aplicando la siguiente fórmula [24].

$$HRT(d) = V_{digestor}/V_{input} \quad (3.7)$$

donde:

$V_{digestor}$  = Volumen total del biodigestor ( $m^3$ )

$V_{input}$  = Entrada diaria total ( $m^3 d^{-1}$ )

### **3.5. Recargas posteriores de sustrato**

La producción de biogás se mantendrá a lo largo de 10-12 días aproximadamente, cuando el volumen de biogás empiece a disminuir se tendrán que realizar las recargas correspondientes para que no se detenga la producción, para llevarlas a cabo es necesario que primero se homogenice completamente la mezcla dentro del biodigestor con ayuda del sistema de agitación para que salga la mezcla (sólido + líquido) y no sólo el líquido, luego se abrirá la válvula de salida y se iniciará la recarga de biomasa igual que al principio, primero haciendo la mezcla agua-estiércol y después se abre la válvula para que fluya por la tubería que la conducirá al interior, la cantidad que se introducirá será alrededor de un 6% del volumen inicial. En esta fase se iniciará la medición de DQO a la salida.

### **3.6. Conclusiones**

Los parámetros de evaluación de biodigestores pueden ser monitoreados con distintos equipos de medición desde los más sofisticados hasta los más sencillos, en este caso se utilizarán los equipos que se tienen disponibles para tal fin y algunos otros se construirán. Existen diferentes esquemas de monitoreo, el número de parámetros y la frecuencia de medición depende del esquema que se pretenda seguir, tomando en cuenta las características físicas e instalación del dispositivo experimental y el equipo e instrumentos de medición con los que se cuentan. Los métodos descritos en esta metodología pueden contribuir a entender que está pasando dentro del reactor y tomar medidas en caso que se presente alguna inestabilidad para mantener un proceso adecuado. La determinación del comportamiento del biodigestor viene dado por todos los parámetros que influyen durante el proceso de producción de biogás, al monitorearlo por cierto tiempo permitirá determinar qué tan eficiente resulta utilizar este dispositivo además de reconocer las fallas que se pudieran presentar cuando se instale en comunidades rurales.

# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

### 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del desempeño de un biodigestor rígido modelo DM1, durante el proceso de producción de biogás y bioabono, a partir de estiércol de ganado bovino. En el experimento se utilizó un biodigestor de plástico elaborado en polietileno de alta densidad (PEAD) con un sistema de agitación de poli cloruro de vinilo (PVC), con un volumen total de 1100 litros, de los cuales aproximadamente 900 litros (82 %) son ocupados por la mezcla de materia orgánica. Para llenar el biodigestor bastaron 360 kg de estiércol y 540 litros de agua (relación 1:1.5). Las características de ésta mezcla fueron las siguientes: 23065 mg/l en términos de DQO, 85.5 g/l de ST, 60.6 g/l de SV y un pH de 8.1.

Después que la producción de biogás comenzó a decrecer el biodigestor se cargó con un volumen de 72 litros de mezcla (estiércol-agua) cada tres días, es decir, con una velocidad de carga orgánica de 1.45 kg SV/ día, el tiempo de retención fue de 32 días.

Se evaluó este tipo de desecho orgánico con el fin de analizar variables relacionadas con la operación y la influencia de la agitación en la temperatura y la producción de biogás, además de comparar la eficiencia del sustrato para producir biogás. Asimismo se determinaron las variables necesarias utilizando los diferentes métodos y equipos de medición para describir su desempeño durante la operación, cuyos resultados se muestran en este capítulo según el procedimiento establecido para la evaluación del biodigestor (ver sección 3.4).

## 4.2. Condiciones necesarias para realizar el experimento

En esta sección se describe de forma general el sistema de biodigestión y sus modificaciones para su mejor funcionamiento y evaluación. Se describen sus partes y componentes así como sus funciones fundamentales.

### 4.2.1. Esquema general del sistema de biodigestión anaerobia

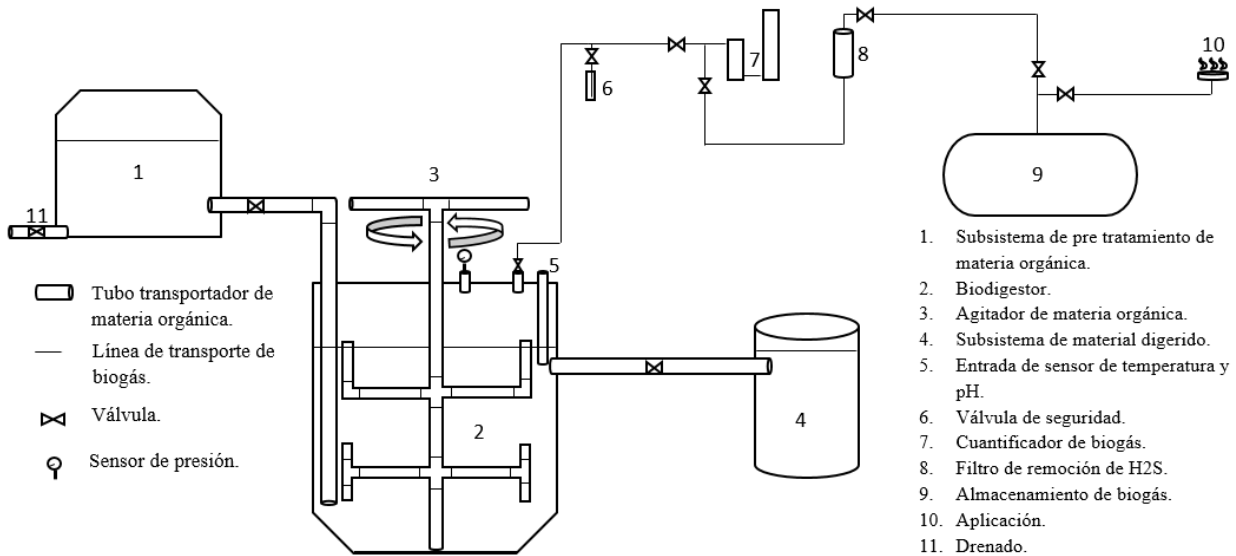


Figura 4.1: Esquema general del sistema de biodigestión anaerobia.

A partir de las evaluaciones realizadas al biodigestor modelo DM1 que se encontraba instalado, se determinó que no contaba con las condiciones adecuadas para llevar a cabo las mediciones, puesto que durante el proceso se encontraron fugas tanto en el reactor como en la tubería de biogás (ver apéndice A), provocando perturbaciones en las mediciones, por esta razón surge la necesidad de construir un nuevo sistema (ver apéndice B) el cual se describe a continuación:

De forma general un sistema de biodigestión está compuesto por seis subsistemas (Figura 4.1):

1. Subsistema de adecuación de la materia orgánica y biogás. La materia orgánica es depositada en un recipiente con capacidad de 250 litros (1) donde se realiza el pre tratamiento y adecuación de la misma, es decir, se homogeniza la mezcla estiércol/agua y se retira cualquier material que no sea biodegradable, cabe mencionar que el tubo para la salida de materia orgánica de este recipiente es de 4" y está separado a 15 cm del fondo, con la finalidad de evitar que las materias extrañas comúnmente piedras que contiene el estiércol



entren al biodigestor y una válvula de drenado de  $1\frac{1}{2}$ " (11) acoplada a la parte inferior lateral para realizar la limpieza.

El biogás generado antes de ser utilizado en diversas aplicaciones pasa por un filtro (8) que cuenta con la capacidad de remover el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) más de un 90%, y en función de la aplicación se puede aumentar su presión a través de un proceso de compresión por diferentes vías, ya sea almacenado en tanques de alta presión o sistema de resortes flexibles para generar presión en la bolsa de almacenamiento (9).

2. Subsistema de transformación de la materia orgánica. Este subsistema es comúnmente conocido como biodigestor el cual es el elemento más característico e importante del sistema, porque en él ocurren las reacciones fundamentales que permiten la producción de biogás y bioabono. Este dispositivo es colocado con la tapa hacia abajo para evitar fugas de biogás, es de color oscuro para favorecer la absorción de la radiación solar. Cuenta con un agitador (3) constituido por dos aspas unidas a un tubo central, fabricado de tubería de PVC hidráulico de 2" de diámetro, dicho agitador (ver apéndice C) permite establecer una homogeneidad de temperatura y distribución de bacterias. Además en su parte superior están acoplados de forma conveniente dos tubos de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro con su válvula de control para la salida de biogás y presión y otro sin válvula para introducir sensores de pH y temperatura (5).
3. Subsistema de transporte y almacenamiento materia orgánica y del biogás. La mezcla de materia orgánica es transportada en su primera fase desde el recipiente de pre tratamiento hasta el biodigestor y en una segunda fase desde la salida del reactor hasta un receptor del material digerido (4) el cual almacenará en periodos adecuados la materia orgánica procesada y permitirá la separación del bioabono líquido y sólido.

La mezcla de gases producida en el reactor es transportada a través de conductos especiales (5) hasta el subsistema de almacenamiento. Por lo general, este conducto es una manguera flexible resistente a los componentes del biogás. Para el almacenamiento de este biocombustible se utilizó una bolsa de geomembrana (9) de alta flexibilidad con un volumen de aproximadamente  $1.5\text{ m}^3$ . Esta bolsa también cuenta con una válvula de salida

que permite la conducción de biogás hasta las diferentes formas de utilización.

4. Subsistema de seguridad y protección. El reactor se enterró a 1.7 m de profundidad lo cual le permitió mantener estabilidad térmica y alrededor del mismo se construyó una pared de blocks que rodea la parte inferior y lateral del reactor, esto evita la incidencia de la presión en la parte lateral provocada por la acumulación de agua u otros elementos. El sensor de presión acoplado a la parte superior permite al usuario dar un seguimiento de la presiones dentro del dispositivo. Asimismo para evitar sobrepresiones y posibles deterioros del sistema en la aplicación de cocción de alimentos en zonas rurales se utiliza una válvula de alivio (6).
5. Subsistema para la evaluación y caracterización del sistema. Se acondicionaron los elementos de medición necesarios (ver 4.2.2 y 4.2.3) para llevar a cabo investigaciones científicas y estimaciones del desempeño general de este tipo de dispositivo.
6. Subsistema de utilización del biogás. El biogás generado puede ser utilizado en diferentes aplicaciones especialmente es de gran interés la generación de electricidad, secadores solares, así como cocción de alimentos.

## **4.2.2. Rehabilitación de los elementos que componen el sistema de biodigestión**

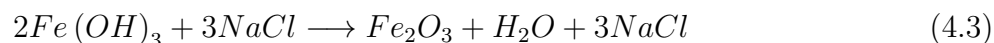
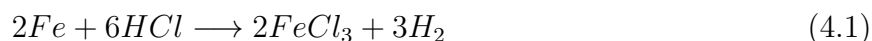
### **4.2.2.1. Biodigestor o reactor**

Teniendo en cuenta las dificultades encontradas (fugas de biogás, colocación incorrecta de los dispositivos de medición y poco espacio de almacenamiento inicial de biogás) en el biodigestor DM1 con la tapa hacia arriba, se construyó un nuevo reactor colocado en posición inversa (ver apéndice B).

#### 4.2.2.2. Filtro de remoción de H<sub>2</sub>S

Se rehabilitó un filtro de virutas de hierro. Primero se vació completamente, retirando la viruta antigua, después se llevó a cabo la oxidación de viruta de hierro (Figura 4.2) obtenida de un torno, para esto se realizó un proceso de lavado con detergente para eliminar la grasa y otras suciedades que pudiera traer la viruta, y se dejó secar al aire libre, en seguida se sumergieron en una solución con 150 ml de ácido clorhídrico (HCl) y 20 litros de agua durante una hora, se extrajeron y se dejaron secar al aire libre (ecuación 4.1), por último se sumergieron en una solución con 50 g de hidróxido de sodio (NaOH) y 20 litros de agua durante una hora (ecuación 4.2) y se dejaron secar al aire libre (ecuación 4.3), una vez secas se llenó el filtro con el material obtenido se utilizaron 1068 g (Figura 4.5 ).

Las ecuaciones del proceso son las siguientes:



Después de realizar este proceso no se logró obtener óxido de hierro como se esperaba, en cambio se obtuvo cloruro de hierro (FeCl<sub>3</sub>), a esto se le asocia que no se consideró la aplicación de calor. Habría que decir también que este material reacciona con el H<sub>2</sub>S (ecuación 4.4).





(a) Lavado



(b) Solución de HCl



(c) Solución de NaOH

Figura 4.2: Proceso de tratamiento de virutas de hierro



(a) Secado al aire libre



(b) Llenando el filtro

Figura 4.3: Proceso de secado y llenado.

#### 4.2.2.3. Subsistema de almacenamiento de biogás

Se verificó que la bolsa de geomembrana (Figura 4.4) no tuviera ninguna fuga, para esto se introdujo aire y con agua jabonosa se detectaron algunas fugas por esto se procedió a sellar por el método de termofusión con una pistola de calor. Es importante tener en cuenta los intervalos de temperatura adecuados en el proceso de termofusión en función al tipo de material debido a que poca temperatura no es suficiente para lograr un buen sellado y demasiada temperatura provoca la destrucción del material.



Figura 4.4: Bolsa de geomembrana llena de aire.

### 4.2.3. Elementos para la evaluación de los parámetros operacionales del biodigestor

#### 4.2.3.1. Cuantificador de biogás: diseño, construcción e instalación

El cuantificador se diseñó en el *software Sketchup 2016* (Figura 4.5a) y fue construido (Figura 4.5b) con material de PVC para uso sanitario (ver apéndice D) porque es de bajo costo y resistente a los componentes del biogás.

Como se muestra en la Figura 4.5a está constituido de dos tubos uno de 1 m y otro de 0.5 m, ambos de 6" de diámetro conectados entre sí por medio de una válvula de  $\frac{1}{2}$ ".

La cantidad de biogás generado se observa a través de dos mangueras transparentes graduadas en ml, las cuales están conectadas a ambos lados de los tubos y a la conexión inferior entre ambos tubos (Figura 4.5a), lo cual permite que se pueda medir la cantidad de biogás a través del desplazamiento de agua que previamente ha sido colocada en los tubos.

Luego de ser construido se verificó que no existieran fugas y se adaptó al biodigestor para realizar las mediciones (Figura 4.5d). Finalmente se realizaron pruebas introduciendo aire para verificar su funcionamiento y evitar fallas posteriores (Figura 4.5e).



Figura 4.5: Cuantificador de biogás.

#### 4.2.3.2. Termopares, pH-metro y manómetro

Dentro de las variables significativas para evaluar el comportamiento del biodigestor se encuentran la temperatura, presión y pH. Para la medición de la temperatura se acondicionaron 6 termopares tipo K a dos tubo de CPVC de  $\frac{1}{2}$ " como se muestra en la Figura 4.6, uno colocado de forma adecuada hacia el interior del biodigestor y otro enterrado fuera del biodigestor. Como se muestra en la Figura 4.6b a estos tubos se le realizó una especie de orificios a medio metro de separación cada uno, de tal manera que los sensores estuvieran en contacto directo con el medio circundante. Paralelamente se calibró el pH-metro utilizando tres soluciones *buffer* (4.01, 7.00 y 10.01) (ver apéndice E) y además se adquirió un manómetro analógico.

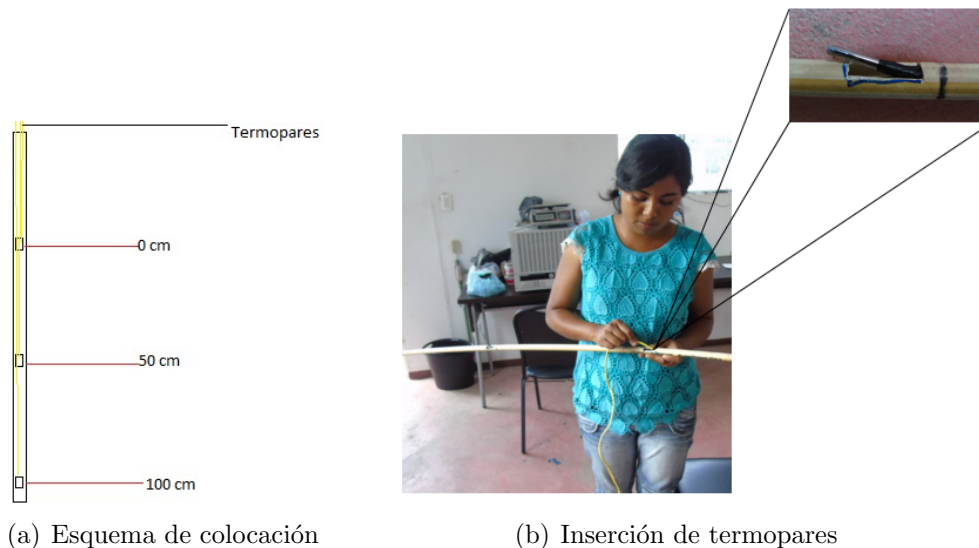


Figura 4.6: Termopares.

### 4.3. Evaluación de los parámetros operacionales

#### 4.3.1. Características nutrimentales del estiércol bovino

El estiércol de ganado bovino utilizado en esta evaluación se recolectó en la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). Un estudio realizado a nivel nacional por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) [66] muestra la composición nutrimental de este tipo de residuo orgánico (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Características nutrimentales del estiércol bovino.

Nitrógeno total (%)	1.5
Fósforo (%)	0.6
Potasio (%)	2.6
Calcio (%)	3.2
Magnesio (%)	0.8
Sodio (%)	1.6
Zinc (ppm)	130.6
Manganeso (ppm)	264
Hierro (ppm)	<354
Relación C/N	26

El contenido de humedad, pH, sólidos volátiles (SVT) expresados como materia orgánica, los sólidos totales (ST) y la demanda química de oxígeno (DQO) de la mezcla con relación 1:1.5, se determinaron al inicio del proceso.

La determinación de sólidos se realizó tomando en cuenta la metodología descrita en la

norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 (ver sección 3.4.1), primero se introdujo la cápsula vacía en una mufla marca Felisa a una temperatura de 550 °C por 20 minutos, luego se transfirió a un horno (marca Binder) a 105 °C por 20 minutos, finalmente se sacaron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para registrar su peso, este ciclo se repitió hasta alcanzar un peso constante y se registró como peso G.

Se tomaron 100 ml de la muestra (Figura 4.7a), en seguida se transfirieron a la cápsula de porcelana que previamente fue puesta a peso constante, luego se llevó a sequedad en el horno a 105 °C bastaron 13 horas para que se evaporara toda el agua contenida en la muestra, una vez seca (Figura 4.7b) se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y registrar como peso G1.

A continuación, se transfirió la cápsula conteniendo la muestra seca a la mufla a 550 °C durante 20 minutos, después se introdujo al horno durante 20 minutos, se sacó y se dejó enfriar (Figura 4.7c). Finalmente se pesó y se registró como peso G2.

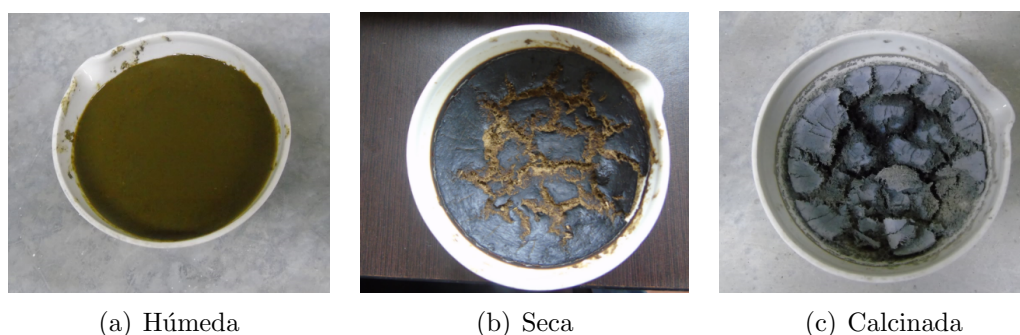


Figura 4.7: Muestras de estiércol.

Estos datos se utilizaron para determinar los sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SVT) respectivamente (Tabla 4.2), con las fórmulas 3.3 y 3.4 descritas en la metodología (ver sección 3.4.1).

Para determinar el contenido de humedad se utilizó el porcentaje de sólidos totales (% ST), realizando la siguiente operación: % de humedad =  $100 - \%ST$

El valor de pH se realizó tomando tres muestras de la mezcla en vasos de precipitado e introduciendo el electrodo del pH-metro directamente en cada una de las muestras, luego se tomó como valor real un promedio de los tres valores medidos. La DQO se midió utilizando el procedimiento descrito en el capítulo anterior (ver sección 3.4.2).



Tabla 4.2: Pesos de las muestras y determinación de ST y SVT.

Muestra con relación (1:1.5)	Unidades
Humedad (%)	91.5
Peso de la cápsula vacía (g)	64.70
Peso de la cápsula + muestra húmeda(g)	161.810
Peso de la cápsula + muestra seca (g)	73.150
Peso de la cápsula + muestra calcinada (g)	67.090
ST (g/L)	84.5
ST (%)	8.5
SVT (g/L)	60.6
SVT (%)	71.71

Los parámetros medidos se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros experimentales de la mezcla estiércol/agua.

Humedad (%)	91.55
pH	8.1
Materia orgánica (%)	71.71
Sólidos totales (% ST)	8.45
DQO (mg/l)	23065

### 4.3.2. Producción de biogás

La producción de biogás se llevó a cabo a partir de estiércol bovino sin ningún tipo de inóculo, ya que se tomaron las condiciones que más se asemejan a las existentes en comunidades rurales o granjas del estado de Chiapas, en las cuales la mayoría de las veces no se cuenta con inóculo.

Considerando al biogás como gas ideal entonces a la producción de biogás medida se le aplica la corrección para obtener los valores tomando en cuenta las condiciones normales de presión y temperatura (25 °C y 1 atm)(ecuaciones 4.5 y 4.6).

$$\frac{V_2 P_2}{T_2} = \frac{V_N P_N}{T_N} \quad (4.5)$$

Despejando  $V_N$

$$V_N = \left( \frac{T_N}{P_N} * \frac{P_2}{T_2} \right) * V_2 \quad (4.6)$$

Donde:

$V_2$ ,  $P_2$  y  $T_2$  son los valores medidos.

$V_N$ ,  $P_N$  y  $T_N$  son los valores en condiciones normales.

En la Figura 4.8 se muestra la producción de metano, dióxido de carbono y oxígeno. A partir de los 14 días de haberse colocado la materia orgánica dentro del reactor se detectó que dentro del biogás el contenido de metano era de 51 %, es decir, que contenía más metano que otros gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , etc), por lo tanto, este día se consideró como punto de partida para iniciar la cuantificación.

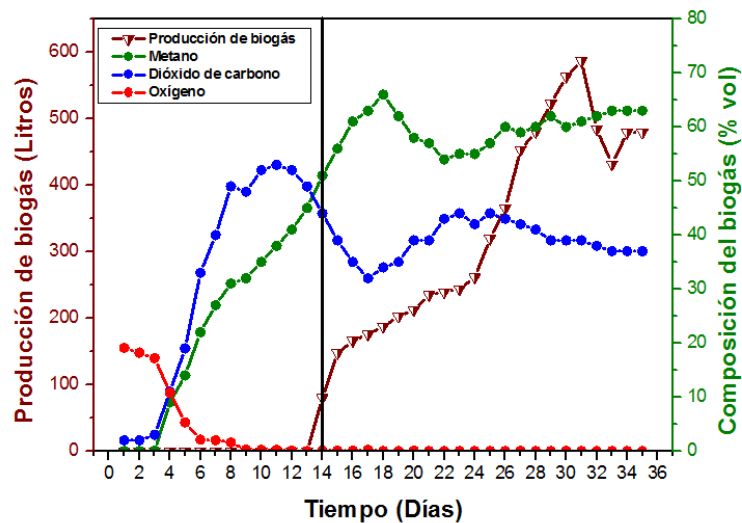


Figura 4.8: Gráfica de la producción y composición de biogás.

Por otro lado, como se muestra en la Figura 4.9 la producción de biogás en condiciones normales de presión y temperatura tuvo un valor máximo y mínimo los días 31 (599 litros) y 14 (80 litros) respectivamente, el promedio fue de 335 L/d. La producción máxima de metano y dióxido de carbono fueron de 366 y 243 L/d, la cantidad mínima fue de 41 y 35 L/d, con un promedio de 201.5 y 131.4 L/d respectivamente.

Con una temperatura promedio de  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  y presión promedio de 0.4 PSIG, se obtuvieron como promedio 352 litros de biogás por día con un valor máximo de 623 litros y un mínimo de 89 litros.

Según estos datos, la cantidad promedio de biogás utilizando este tipo de sustrato alcanza para alrededor de 2.3 horas de cocción de alimentos en una cocina doméstica en zonas rurales cuyo consumo se estima en un intervalo de 130-170 litros por hora. Al mismo tiempo, el biogás producido se puede utilizar en lámparas de gas comerciales, en las cuales se considera un consumo de 90-130 litros por hora según datos reportados en la literatura [48].

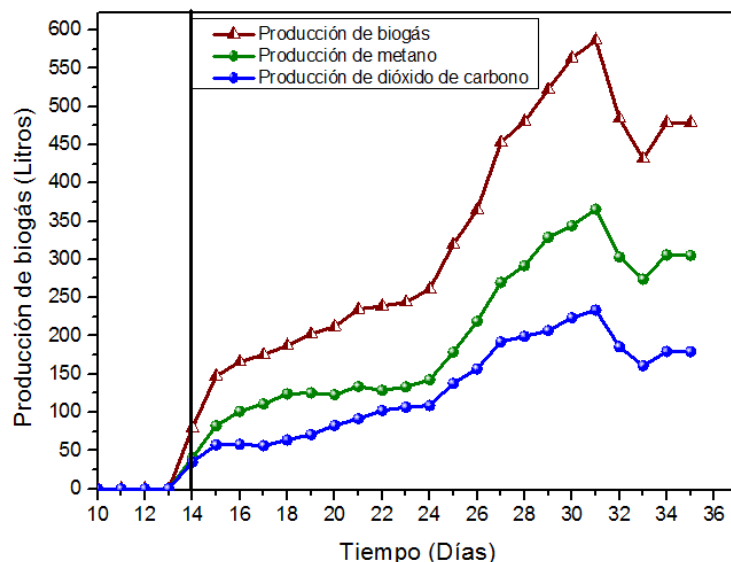


Figura 4.9: Gráfica de la producción de biogás, metano y dióxido de carbono.

A los 32 días la cantidad de biogás comenzó a decrecer, por lo que se realizó una recarga de 72 litros de mezcla (43 litros de agua y 29 kg de estiércol) para estabilizar la producción de biogás por encima de 500 litros por día, cantidad mínima necesaria para 2 o 3 horas de cocción de alimentos.

### 4.3.3. Composición del biogás

El analizador de gases multitec 560 (Figura 3.4), permitió estudiar 3 gases simultáneamente, metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ). A partir de la carga inicial de la mezcla en el biodigestor se realizaron mediciones diarias que permitieron evaluar la composición del biogás en todo el periodo de retención de la carga.

En investigaciones realizadas a nivel laboratorio cuantifican la cantidad de biogás en el momento que se detecta presión, sin embargo, como se muestra en la Figura 4.10 a partir del sexto día de digestión hay presencia de presión pero la composición del biogás está conformada por 22% de  $\text{CH}_4$ , 33% de  $\text{CO}_2$  y 2.1% de  $\text{O}_2$  lo que imposibilita la existencia de flama debido a que existe una mayor concentración de gases no combustibles.

A partir del día 14 la concentración de  $\text{CH}_4$  respecto al  $\text{CO}_2$  fue de 51% y 44% respectivamente, por lo que empieza a tener concentraciones factibles de  $\text{CH}_4$  para ser utilizado principalmente en la cocción de alimentos. La concentración de metano comenzó a estabilizarse

por encima de 50 % desde el día 14.

A partir del día 9 la cantidad de oxígeno prácticamente desaparece debido a su consumo por parte de las últimas bacterias aerobias. El máximo valor de la cantidad de metano se obtiene el día 18 (66 %) coincidiendo con una disminución de la concentración de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ .

Por otro lado, Chae et al. (2008) [14] encontraron que la composición del biogás varía de acuerdo a la temperatura, considerando que a 35 °C la concentración de metano es 65.3 %, a 30 °C se tiene un 64 % y a 25 °C un 62 %, lo que se relaciona con lo obtenido en nuestro experimento dado que a una temperatura promedio de 27 °C se tenía un 63 % de  $\text{CH}_4$ .

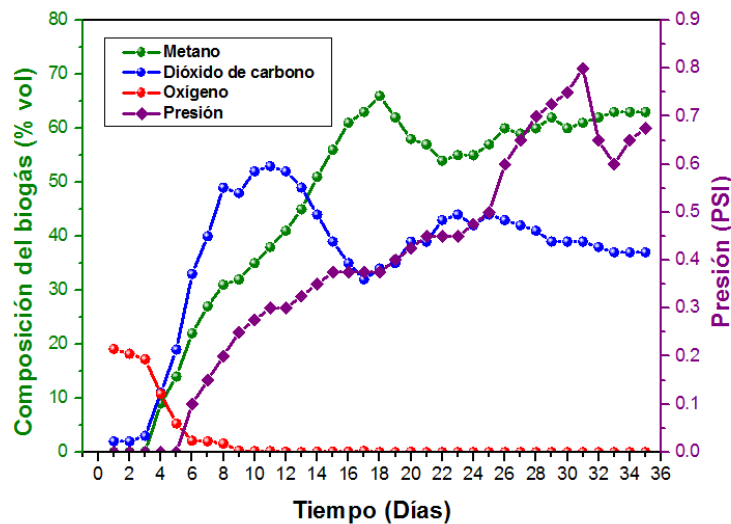


Figura 4.10: Gráfica de la composición del biogás y presión durante el proceso de digestión anaerobia.

#### 4.3.4. Comportamiento de la temperatura

La temperatura en el interior de un biodigestor es un parámetro esencial para que los microorganismos se activen y se mantengan en condiciones adecuadas para realizar su trabajo.

En la Figura 4.11 se muestra que a pesar de las fluctuaciones de la temperatura ambiente y del suelo circundante al biodigestor, la temperatura interna mantiene un equilibrio de 27 °C como promedio, predominando el régimen mesofílico (25-40 °C), con variaciones promedio de  $\pm 0.1$  °C en un periodo de 24 horas. La temperatura máxima fue de 27.4 °C y la mínima de 26.6 °C, siendo este valor un promedio de la temperatura en tres profundidades diferentes (0, 50 y 100 cm).

De acuerdo a Hilbert, J, A. (2006) [36], la sensibilidad de las bacterias mesófilas es de  $\pm 1$  °C por hora, es decir, que no debe haber variaciones de la temperatura interna de  $\pm 1$  °C ya que si estas variaciones son bruscas en un intervalo de tiempo relativamente corto las bacterias disminuyen su población, y asimismo se reduce la producción de biogás.

Además Weiland, (2010) [73] menciona que es importante mantener una temperatura constante durante el proceso de digestión, dado que los cambios de temperatura afectan la producción de biogás. Las bacterias mesófilas toleran fluctuaciones de  $\pm 3$  °C sin reducciones significativas en la producción de metano. A su vez Chae et al. (2008) [14] llegaron a la conclusión que cambios bruscos de temperatura de 35 a 30 °C y de 30 a 32 °C da como resultado una disminución en la producción de biogás alrededor de 7.2%.

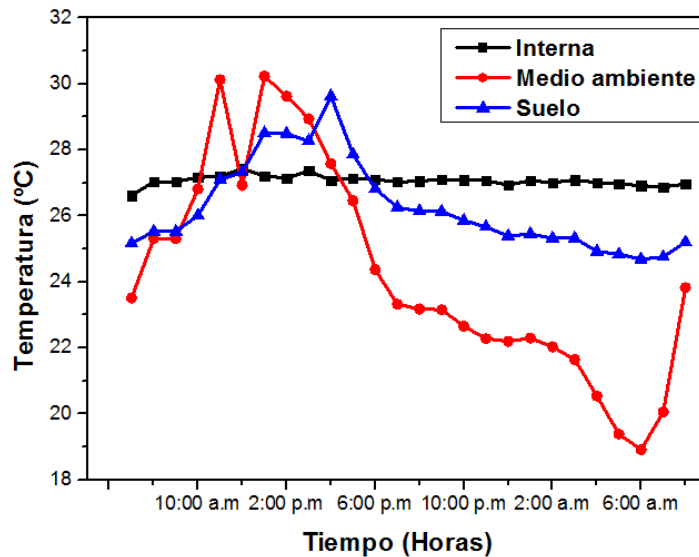


Figura 4.11: Gráfica de comportamiento de la temperatura interna, del suelo y del ambiente durante 24 horas.

Se puede observar en la Figura 4.12 que la temperatura tiene una relación directamente proporcional a la producción de biogás, ya que a medida que aumenta o disminuye la temperatura también ocurre el mismo proceso en la producción de biogás.

Es importante señalar que se pueden obtener mayores producciones de biogás si se logra aumentar la temperatura dentro del reactor a través de procesos externos, puesto que se ha demostrado que una temperatura termofílica es más eficaz para la producción de biogás que una temperatura mesófila [40]; sin embargo se debe tener en cuenta que al aumentar la temperatura también aumenta la concentración de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) libre [5] [33] el cual es una sustancia

tóxica para los microorganismos involucrados en el proceso.

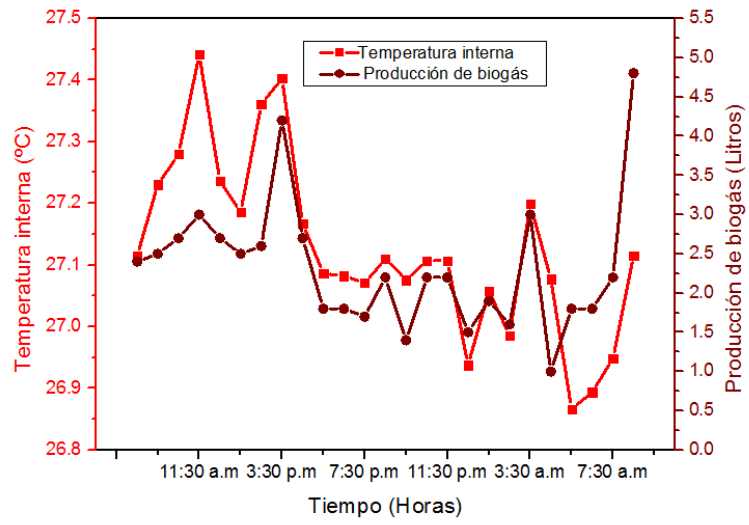


Figura 4.12: Gráfica del comportamiento de la temperatura interna vs producción de biogás durante 24 horas.

### 4.3.5. Comportamiento de la presión

La presión en este tipo de biodigestor fue un parámetro muy importante durante la operación, ya que se obtuvo como presión máxima acumulativa un valor de 0.8 PSIG (Figura 4.13), mientras que los biodigestores de geomembrana resisten hasta un máximo de 0.0725 PSIG y de acuerdo a Magaña, et al. (2006) [47] un biodigestor a nivel laboratorio de acero inoxidable alcanza una presión máxima de 5 PSIG.

Lo anterior significa que los biodigestores rígidos modelo DM1 soportan alrededor de 10 veces más presión que los de geomembrana y 6.25 veces menos que uno de acero inoxidable.

Para aplicaciones de cocción de alimentos en comunidades rurales, esta presión es adecuada ya que permite una circulación de los gases hacia el lugar de consumo sin ningún tipo de riesgo a la seguridad de las personas. Es importante continuar trabajando en los sistemas de sellado de este tipo de biodigestor pues permitiría aumentar más la presión dentro del mismo, sin el riesgo de escape de biogás.

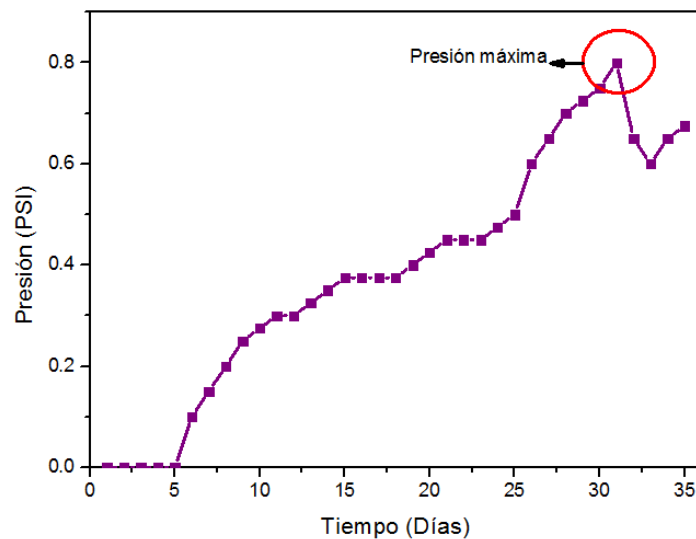


Figura 4.13: Gráfica del comportamiento de la presión durante el proceso de producción de biogás.

### 4.3.6. Comportamiento del pH

Para la medición del pH se utilizó un pH-metro con características adecuadas (ver Figura 3.7). Como se puede apreciar en la Figura 4.14 el valor de pH máximo obtenido fue 7.5 y el mínimo 6.4. El promedio de los datos fue de 7.1.

El pH óptimo es 7, sin embargo se puede ver en la Figura 4.14 del día 4 al 10, el valor de pH es relativamente ácido, lo cual indica que se encuentra en la etapa de acidogénesis, es decir, existe una acumulación de ácidos grasos volátiles (Tabla 4.4).

En la etapa de metanogénesis (a partir del día 12) se observa claramente que el valor de pH se mantiene cerca de la neutralidad, lo cual favorece para que el proceso se mantenga estable ya que Ward et al. (2008) [72] indica que el nivel de pH adecuado para la metanogénesis oscila entre 6,8 y 7,2, Weiland, (2010) [73] afirma que el pH por debajo de 7 inhibe las bacterias metanogénicas. Por otra parte durante la etapa de hidrólisis y acidogénesis los niveles de pH apropiados son 5.5 y 6.5 respectivamente [39].

En la Figura 4.14 se demuestra que durante el proceso de digestión anaerobia a partir de estiércol bovino no se necesitó la adición de sustancias alcalinas o ácidas para estabilizar el proceso, en comparación con otros sustratos como la mezcla de frutas y verduras que necesita la adición de bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) 5 M [64] para equilibrar los valores de pH.

De acuerdo a Buekens, (2005) [9] el rango de pH aceptable teóricamente es 5.5-8.5. Por lo tanto, los valores promedios obtenidos de pH se consideran aceptables.

Tabla 4.4: Valores de pH y sus interpretaciones.

Valor de pH	Interpretación
7-8	El proceso es estable
<7	Acumulación de AGV
>8	Acumulación de $\text{NH}_3$

[24]



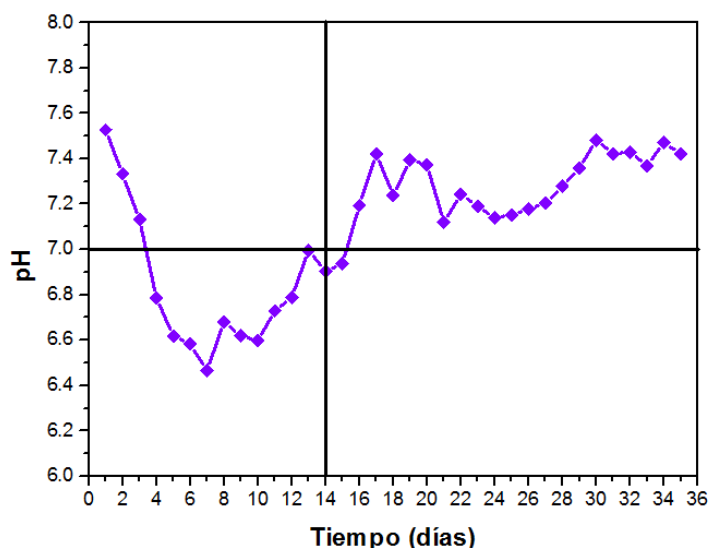


Figura 4.14: Gráfica de comportamiento del pH durante la digestión anaerobia.

#### 4.3.7. Comportamiento de los ácidos grasos volátiles (AGV)

La acumulación de AGV es normal durante la etapa de acidogénesis que en este caso se observa en la segunda semana (Figura 4.15), sin embargo, según Carrillo, L. (2003) [12] para que se lleve a acabo correctamente el proceso de producción de biogás la concentración se debe mantener entre 2000 y 3000 mg/l expresados como ácido acético, ya que si sobrepasan este rango se podría inhibir la producción de biogás.

Asimismo en la Figura 4.15 se muestra que la concentración de AGV es inversamente proporcional al valor de pH, dado que una acumulación de AGV representa un pH bajo, en esta evaluación se obtuvo un promedio de 2299.5 mg/l, lo que indica que se mantuvo dentro del intervalo establecido. En otros estudios se han encontrado valores entre 1000-2000 mg/l de ácido acético en la digestión anaerobia de desechos de comida en un régimen mesofílico (35-45 °C) [41].

Después de la tercera semana se hace notar que los AGV disminuyen debido a la degradación de los mismos para ser convertidos en metano y dióxido de carbono. Algunos autores como Drogg, B. (2013) [24] reportan que un proceso estable es cuando los AGV se mantienen por debajo de los 1000 mg/l y que a una concentración mayor a 4000 mg/l representa una acumulación excesiva de AGV (Tabla 4.5) lo que coincide con lo establecido por Carrillo, L. (2003) [12] que una alta concentración de AGV indican que existe algún problema en el proceso.

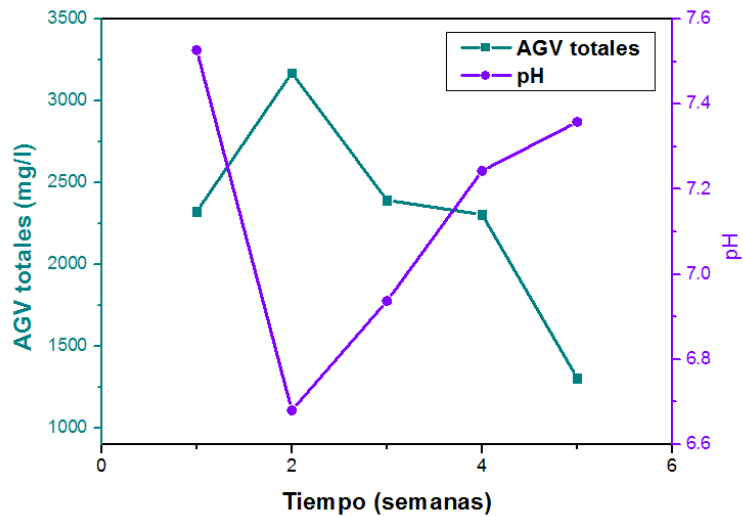


Figura 4.15: Gráfica del comportamiento de los AGV a lo largo del tiempo.

Tabla 4.5: Valores de AGV y sus interpretaciones.

Intervalo de AGV totales (mg/l)	Interpretación
<1,000	Proceso estable
1,000 - 4,000	Intervalo en el que los procesos estables, así como inestables son posibles.
>4,000	Las altas concentraciones de AGV son normalmente una indicación de problemas de proceso.

[24]

#### 4.3.8. Comportamiento de la alcalinidad

Como se puede observar en la gráfica 4.16 en la semana dos hay un aumento en la concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) lo que se asocia con la etapa de acidogénesis, es decir, asimismo que se producen AGV hay una compensación en la concentración de  $\text{CaCO}_3$ . La concentración de esta sustancia se mantuvo en un promedio de 3910 mg/l lo cual indica que está dentro del rango establecido, dado que McCarty (1964) [70] y Vázquez y Sánchez (2015) [50] consideran que para mantener un funcionamiento adecuado en un biodigestor la concentración de  $\text{CaCO}_3$  debe situarse entre 1000 a 5000 mg/l.

Del mismo modo en otras investigaciones han demostrado que el intervalo de alcalinidad entre 2000-4000 mg/l es apropiada para el proceso de digestión anaerobia en el régimen mesofílico de desechos orgánicos [15] [63].

Por otro lado Callaghan et al. (2002) sugiere que para obtener una digestión anaerobia equilibrada la alcalinidad no debe ser inferior a 1500 mg/l [10], lo que difiere con Hawkes et al.

(1993) [34] quien afirma que la alcalinidad debe ser al menos de 1000 mg/l para una operación exitosa, al mismo tiempo se puede decir que nuestro experimento se mantuvo en un proceso equilibrado porque se obtuvieron valores mayores a 1500 mg/l en el transcurso del proceso.

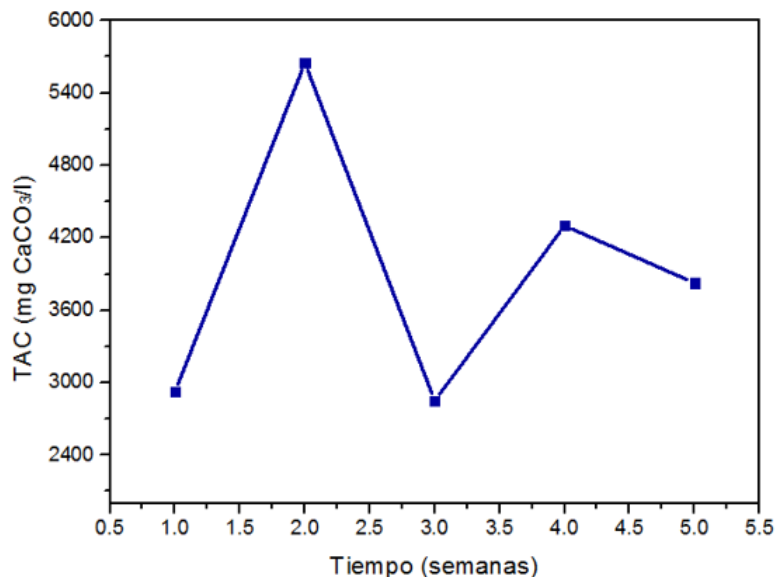


Figura 4.16: Gráfica del comportamiento de la concentración de  $\text{CaCO}_3$ .

La relación FOS/TAC permite detectar a tiempo los problemas del proceso, hasta una inminente falla en la fase biológica del biodigestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente, en la práctica un valor de 0.3 a 0.4 es normal [26], otros autores [10] reportan que en un valor  $<4$  el proceso es relativamente estable y un intervalo entre 0.4-0.8 son señales de inestabilidad.

Como se puede apreciar en la Figura 4.17 a medida que el proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo la relación de alcalinidad va disminuyendo como consecuencia de la degradación de materia orgánica. En la sección 4.3.2 se observa que la producción de biogás empezó a decaer a partir del día 32 que corresponde a la mitad de la semana 5 lo que coincide con la disminución en la relación de alcalinidad. En tal sentido es recomendable iniciar la adición de materia fresca para mantener una estabilización tanto en la alcalinidad como en la producción de biogás.

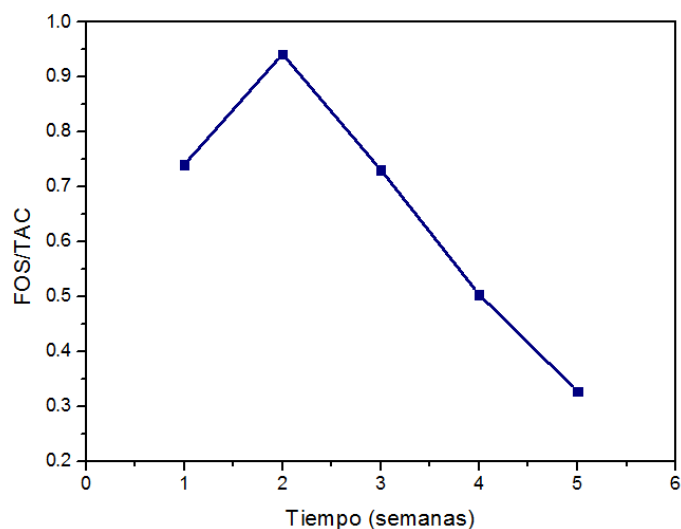


Figura 4.17: Gráfica del comportamiento de la relación de alcalinidad del sustrato.

#### 4.3.9. Evaluación del filtro de remoción de $H_2S$

El biogás como ya se ha visto es una mezcla de gases en la que existen concentraciones menores del 1 % de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), el cual a pesar de encontrarse en una concentración relativamente insignificante puede causar efectos nocivos tanto en la salud, en el ambiente como en las diferentes aplicaciones en los que se utilice el biogás. Por lo que se hace necesario disminuir esta concentración al mínimo posible para evitar las consecuencias anteriormente explicadas.

En la Figura 4.18 se muestra la concentración del  $H_2S$  en el biogás, obteniéndose como promedio 394.3 ppm, un máximo de 638 ppm y un mínimo de 278 ppm antes de pasar por el filtro, y después de pasar por el filtro se obtuvo un promedio de 20.3 ppm, un máximo de 56 ppm y un mínimo de 0 ppm, asimismo se puede afirmar que la remoción de  $H_2S$  promedio fue de 94.5 %.

Por otro lado Coto, J, E, et al. (2007) [20] reporta que al utilizar óxido de calcio ( $CaO$ ) se puede remover hasta un 95 % de  $H_2S$  y utilizando hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) se remueve un 96 % de  $H_2S$ , además de remover otros gases. Esto indica que el tipo de material absorbente de  $H_2S$  utilizado en el experimento ( $FeCl_3$ ) muestra un desempeño similar a los materiales anteriormente mencionados.

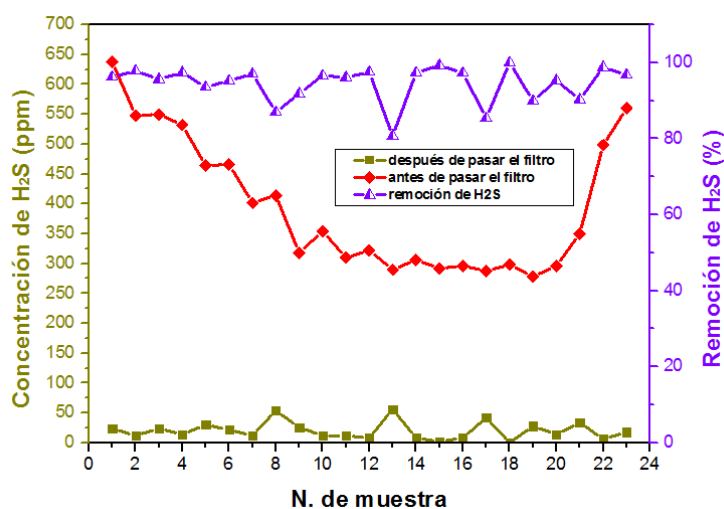


Figura 4.18: Gráfica de la concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás antes y después de pasar por el filtro y su porcentaje de remoción.

#### 4.3.10. Influencia de la agitación en la temperatura interna

La agitación se realizó manualmente a través de un dispositivo con los mecanismos adecuados (ver apéndice C) para mezclar toda la materia orgánica en el interior del reactor, mejorando así el proceso de biodigestión. Asimismo este dispositivo está acoplado de tal manera que realiza sus funciones sin fugas de biogás.

En la Figura 4.19A se observa que la temperatura no es homogénea en el interior del reactor, cuando se realiza agitación se obtiene una distribución adecuada de la misma, así como de las bacterias y materia orgánica. Se realizaron mediciones de temperatura interna durante 10 minutos en tres profundidades diferentes a 100 cm que corresponde al fondo, a 50 cm que corresponde a la mitad del reactor y en la superficie.

Como se observa en la Figura 4.19B existe una mejor distribución de la temperatura en todo el biodigestor producto del proceso de agitación, lo que favorece a una mejor producción de biogás como muestran los resultados del apartado 4.3.5. Para aplicaciones rurales es necesario realizar este tipo de operación al menos tres veces al día durante 10 minutos.

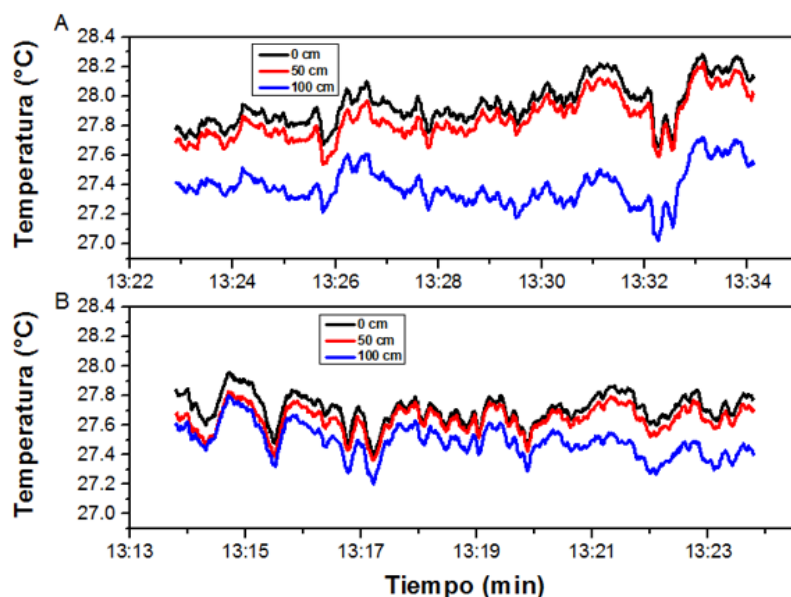


Figura 4.19: Gráfica del comportamiento de la temperatura interna durante 10 minutos: (A) sin agitación y (B) con agitación.

#### 4.3.11. Demanda química de oxígeno (DQO)

Para efectuar la medición de DQO primero se realizó una curva de calibración (Figura 4.20) utilizando biftalato de potasio como sustancia conocida (1 mL de biftalato = 1 mg de DQO), empleando seis puntos de calibración.

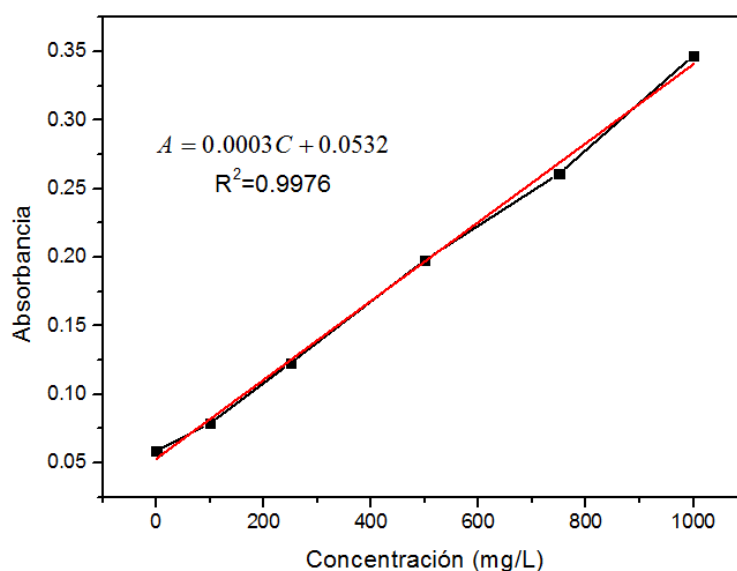


Figura 4.20: Curva de calibración.

Se obtuvo una absorbancia de la muestra inicial de 0.330, utilizando la ecuación 4.7 de la curva de calibración al despejar C se obtiene la DQO a la entrada y a la salida del proceso (ecuación 4.8).

$$A = 0,0003C + 0,0532 \quad (4.7)$$

$$C = A - 0,0532/0,0003 \quad (4.8)$$

donde

C = Concentración en mg/l (DQO).

A = Absorbancia.

La DQO inicial fue de 922.6 mg/l, pero como se utilizó una dilución de la muestra (0.1 ml de muestra + 2.4 ml de agua destilada) la DQO real fue de 23065 mg/l y la DQO al final de la digestión de 312.6 mg/l con una absorbancia de 0.147, pero como se siguió utilizando una dilución entonces la DQO real fue de 7815 mg/l. Obteniéndose así una remoción de la materia orgánica de 66 % en términos de DQO. Este resultado indica que este tipo de biodigestor posee una menor eficiencia (66 %), en comparación con un sistema de biodigestión en serie (96.1 %) [57], un biodigestor de plástico polietileno de invernadero (88 %) y un biodigestor en geomembrana de PVC (89 %) [59].

La eficiencia del proceso que ocurre en el biodigestor modelo DM1 puede ser mejorada significativamente si se combinan parámetros de funcionamiento como el aumento de temperatura a un régimen termofílico puesto que han demostrado que a mayor temperatura la eficiencia es mayor [40] y si se realiza una mejor homogenización en el interior a través de procesos de agitación constante. Con respecto al aumento de temperatura se puede realizar utilizando recirculación de agua caliente suministrada por calentadores solares y la agitación con un motor de paso acoplado a un sistema solar fotovoltaico. Es importante señalar que estos sistemas podrían hasta triplicar el costo actual de este tipo de sistemas de biodigestión por lo que se necesita de un estudio más detallado que incluya la factibilidad técnico-económica.

#### 4.3.12. Bioabono

En términos generales, las características organolépticas y el aspecto visual del material digerido (bioabono) fueron menos desagradables que al inicio del proceso, sobre todo en cuanto al olor, debido a que el H<sub>2</sub>S causante del mal olor se queda como componente del biogás.

Sin embargo cabe resaltar que sería muy importante una evaluación profunda de la respuesta de algunos cultivos con la adición de este material, ya que con las pruebas preliminares que se realizaron se observaron aspectos significativos durante el crecimiento de algunas semillas.

El bioabono obtenido durante el proceso de transformación de la materia orgánica es un valor agregado de gran importancia desde el punto de vista integral para la implementación de este tipo de dispositivos en zonas rurales, pues tanto su parte líquida (Figura 4.21) como sólida tienen una gran disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio los cuales son requerimientos indispensables para el desarrollo y crecimiento de cultivos agrícolas, además, su valor económico es relativamente alto en comparación con la energía generada por lo que la aplicación de los sistemas de biodigestión en zonas rurales debe valorarse de manera integral, considerando además de la obtención de un combustible estos subproductos orgánicos que de forma directa e indirecta permiten significativos ingresos económicos.



Figura 4.21: Bioabono líquido.



# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

- Se logró obtener un sistema de biodigestión con los elementos y condiciones necesarias para la transformación de la materia orgánica en un biocombustible de gran utilidad y bioabono como valor agregado. El cual tiene acoplado un conjunto de dispositivos e instrumentos que permiten la evaluación de su desempeño y diferentes investigaciones científicas. Este sistema de biodigestión se puede proponer para su implementación masiva en comunidades rurales con la seguridad de un correcto funcionamiento.
- Se realizaron las evaluaciones sobre el desempeño de este tipo de dispositivo alimentado con estiércol bovino obteniendo los siguientes resultados:
  - Con una temperatura promedio de 28 °C y presión promedio de 0.4 PSIG, se obtuvieron como promedio 352 litros de biogás por día con un valor máximo de 623 litros y un mínimo de 89 litros, en condiciones normales de presión (1 atm) y temperatura (25 °C) se obtuvo un promedio de 335 litros de biogás por día con un valor máximo de 599 litros y un mínimo de 80 litros en el lapso de 35 días. Con una composición estable de 63 % de metano y 37 % de dióxido de carbono.
  - La presión en este tipo de dispositivos fue un parámetro muy importante ya que se obtuvo como presión máxima acumulativa un valor de 0.8 PSIG sin que el sistema sufriera daños en su estructura, mientras que los biodigestores de geomembrana soportan una presión máxima de 0.07 PSIG, lo que significa que los biodigestores rígidos soportan alrededor de 11 veces mayor presión que los de geomembrana y 6.25 veces menos que los de acero inoxidable.
  - A pesar de las fluctuaciones de la temperatura ambiente y del suelo circundante al biodigestor, la temperatura interna (27.1 ° C en promedio) durante 24 horas mantuvo

una estabilidad térmica con variaciones de  $\pm 0.1$  °C.

- La remoción de H<sub>2</sub>S contenido en el biogás fue por encima del 90 % mediante la utilización de un filtro de FeCl<sub>3</sub>, la concentración máxima antes de pasar por el filtro fue de 638 ppm y la mínima de 278, después de pasar por el filtro la concentración máxima fue de 56 ppm y la mínima de 0 ppm.
- El sistema de agitación cumplió satisfactoriamente la función de homogenización de la materia orgánica y la temperatura lo que tuvo efectos favorables en el desarrollo de las bacterias metanogénicas, las cuales son muy sensibles a cambios bruscos de temperatura.

## 5.1. Recomendaciones

- Para evitar que la tubería de alimentación se congestione de materia orgánica es necesario que el diámetro del tubo sea de 6" y que se coloque inclinado.
- Para la conducción del biogás no se deben utilizar tuberías metálicas o plásticas con uniones pegables con cemento para PVC debido a que en ambos casos ocurren afectaciones debido a incidencia del ácido sulfhídrico.
- Se sugiere colocar una malla metálica perimetral que impida el paso de animales y personas no autorizadas al sistema de biodigestión anaerobia.
- El subsistema de almacenamiento debe tener integrado un conducto generalmente flexible hasta los dispositivos de consumo en caso de que se encuentren a distancias relativamente cercanas, de lo contrario el biogás purificado será almacenado en recipientes a cierta presión y trasladado hacia los lugares de consumo.
- El subsistema de almacenamiento de biogás debe estar relativamente alejado del lugar de consumo.
- Se recomienda no utilizar tiras para pH, ya que al introducir las en el sustrato se humedecen tanto que es prácticamente imposible leer los valores de pH.
- Para obtener medidas de la presión interna con mayor exactitud se debe utilizar un manómetro digital.

## 5.2. Trabajos futuros

- Realizar estudios en el sistema de biodigestión obtenido con otro tipo de materia orgánica.
- Estudiar el desempeño del biocombustible obtenido en diferentes aplicaciones tales como estufas ecológicas, secadores solares y generación eléctrica.
- Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica en la implementación masiva del sistema en comunidades rurales.
- Implementar sistemas basados en energías renovables, tales como calentadores solares y sistemas solares fotovoltaicos que permitan mejorar las condiciones de operación del sistema y consigo la producción y adecuación de biogás.

# Apéndice A

## Inspección del sistema de biodigestión

Se determinó que el biodigestor modelo DM1 ya existente en las instalaciones del centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables no cumplió con los requerimientos necesarios para llevar a cabo su evaluación, ya que se encontraron inconvenientes que afectaron a las mediciones.

Se introdujo aire en el biodigestor utilizando un compresor (Figura A.1), con esto se pudo detectar que el biodigestor tenía fugas.



Figura A.1: Detección de fugas en el biodigestor.

De esta misma manera se pudo establecer la ineficiencia de la tubería de biogás puesto que en ésta no transitó el aire que se inyectó al biodigestor, ya que la tubería no estaba conectada a la línea de biogás y se encontraba obstruida por lodo (Figura A.2a) se estableció también, que personal encargado de dar mantenimiento al pasto al momento de poda del lugar golpean la tubería que se encuentra expuesta originando grietas (Figura A.2b) y provocando fugas de biogás.



(a) Obstruida de lodo



(b) Rota

Figura A.2: Tubería que transporta el biogás.

Se aprecia en las siguientes Figuras A.3 y A.4 las reparaciones realizadas que van desde destapar, limpiar y resellar el biodigestor hasta la reparación de la tubería transportadora de biogás.



(a) Destapado



(b) Realizando limpieza



(c) Sellando la tapa

Figura A.3: Biodigestor



(a) Colocando pegamento



(b) Uniendo la tubería

Figura A.4: Reparación de tubería

## Apéndice B

# Rediseño, construcción e instalación de biodigestor

A pesar de las rehabilitaciones que se realizaron al biodigestor ya existente este no pudo ser sellado en su totalidad, puesto que aún seguía presentando fugas cada vez más pequeñas y de difícil detección. Por tal razón se vio en la necesidad de rediseñar, construir e instalar un biodigestor nuevo. El rediseño se llevó a cabo mediante el *software Sketchup 2016* con las características necesarias para su posterior construcción (Figura B.1).

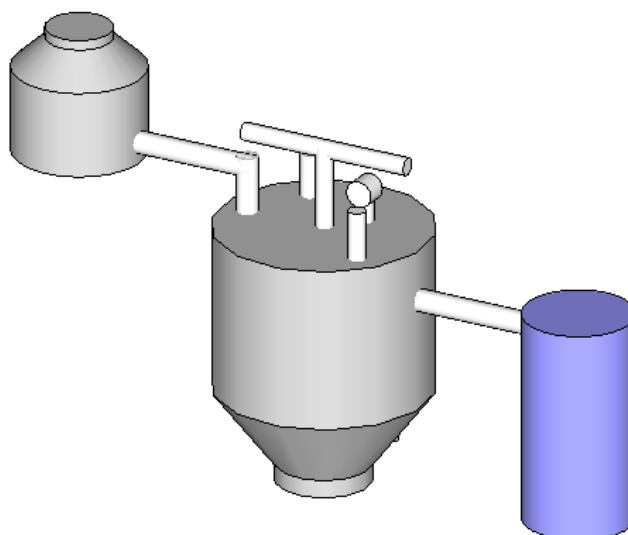


Figura B.1: Diseño de biodigestor.

Para la construcción del reactor se utilizó un tinaco de 1100 litros, a éste se le realizaron los orificios para introducir la tubería tanto de entrada como de salida de la materia orgánica (Figura B.2), de igual manera para el sistema de agitación, salida del biogás y sensores

(temperatura, pH, y presión).



Figura B.2: Realización de orificios.

Luego se lijó la parte interna de los reductores de 3"X2" (Figura B.3a), los cuales sostienen el tubo central del sistema de agitación, después se unieron los conectores de rosca exterior con los de rosca interior, uno en el orificio de la tapa (Figura B.3c) y el otro en el de la parte inferior del tinaco a estos se le añade silicón de altas temperaturas junto con un empaque hecho con cámara de llanta para evitar cualquier fuga (Figura B.3b).



(a) Lijado de reductor



(b) Colocación de empaque y silicón en conector de rosca exterior



(c) Unión de conector de rosca interior y exterior junto con la tapa

Figura B.3: Acoplamiento de la tapa.

Para armar el sistema de agitación, se cortaron 2 tubos de 30 cm y 2 de 14 cm de longitud para las aspas, los cuales se unieron por medio de dos cruz y al final de cada tubo se colocaron 2 "T" todo de 2" de diámetro, anexándole tubos de 10 cm de longitud. Este sistema de agitación se adaptó en el interior del reactor (Figura B.4).





Figura B.4: Construcción del sistema de agitación.

A continuación se trazaron las líneas en el lugar donde sería instalado el sistema y se empezó a cavar un hueco con las dimensiones del tinaco (Figura B.5).



Figura B.5: Realización del hueco que contendrá el biodigestor.

Posteriormente se inició la construcción de una base redonda para el biodigestor, esto le servirá para evitar que la presión de la tierra pueda dañarlo, ésta se realizó con blocks de 14 x 10 x 28, cemento, grava y arena (Figura B.6).



Figura B.6: Construcción de base para el biodigestor.

Finalmente se introdujo el biodigestor dentro de la base para anexarle toda la tubería exterior y adaptar los dos recipientes, uno que realizará la función de pretratar y adecuar el residuo y el otro que contendrá el material digerido (bioabono).



Figura B.7: Instalación del sistema de biodigestión.

# Apéndice C

## Agitador

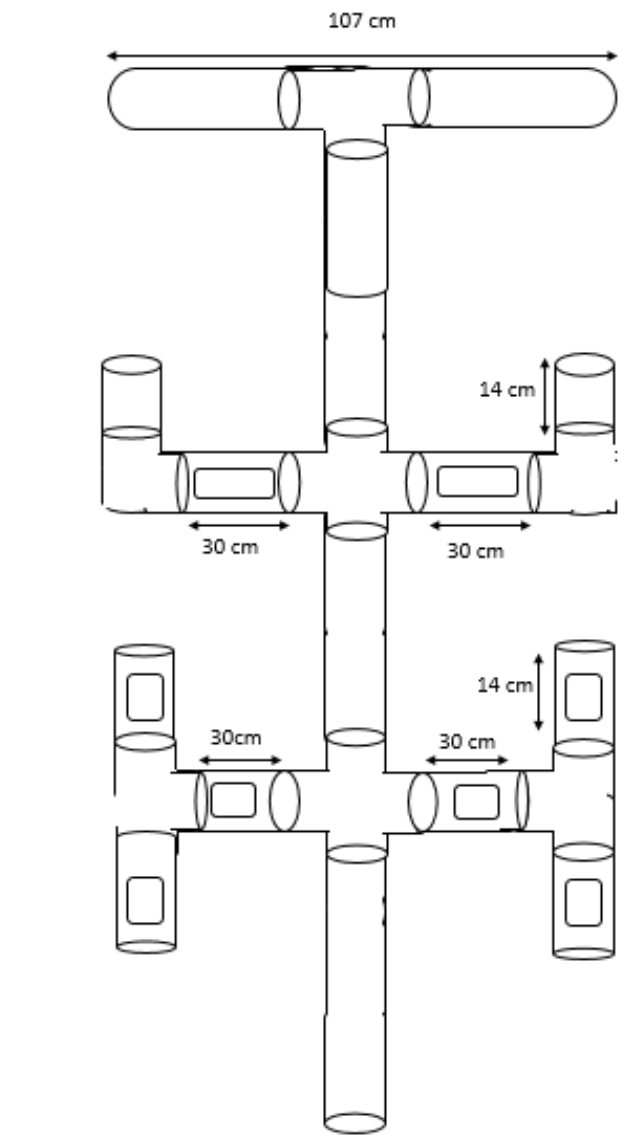


Figura C.1: Agitador.

# Apéndice D

## Construcción del cuantificador

En este apartado se describe el procedimiento para la construcción del medidor de biogás de tal manera que pueda ser entendido por el lector, así mismo se muestra el material utilizado (Figura D.1) y la herramienta (Tabla D.1), cabe mencionar que el monto total del material puede variar, ya que los costos mostrados son del año 2015.

Cantidad	Material	Especificación	Imagen	Precio unitario	Total
1	Tubo	PVC sanitario 6"		\$378.62 / tramo	\$378.62
3	Tapas	PVC sanitario 6"		\$28.45	\$99.01
6	Abrazaderas	Hidrotoma 6"		\$49	\$295.50
4	Copples	PVC hidráulico para cementar 3/4"		\$5	\$18.88
4	Válvulas	Esférica para cementar 1/2"		\$10	\$40
3	Tee	PVC hidráulico para cementar 1/2"		\$2.13	\$6.39
2	Codo	PVC hidráulico para cementar 1/2" X 90°		\$1.33	\$2.66
1	Cemento	Para PVC hidráulico contact azul 8 Oz 240 ml		\$37.80	\$37.80
6	Adaptadores	PVC hidráulico para cementar macho 1/2"		\$1	\$6
6	Adaptadores	PVC hidráulico para cementar hembra 1/2"		\$1.26	\$7.56
2	Adaptadores	de inserción 1/2"		\$5.50	\$11
2	Manguera	industrial 1/2"		\$5.12 / metro	\$10.24
2	Cintas métricas	Flexibles		\$3	\$6
3	Copples	PVC sanitario 6"		\$9.82	\$29.46
1	Cinta teflón	3/4" x 7 m		\$4.79	\$4.79
				<b>TOTAL</b>	<b>\$953.91</b>

Figura D.1: Tabla de material.

Tabla D.1: Herramienta utilizada.

Unidades	Herramienta
1	Broca de $\frac{1}{2}$ "
1	Cortadora de metal
1	Flexómetro
1	Lija 360
1	Llave española
1	Taladro

1. Primero se cortó el tubo de 6" en dos secciones las cuales fueron de 1 m y 50 cm (Figura D.2).



Figura D.2: Corte de tubo a 1 m y 50 cm.

2. Se realizaron perforaciones de  $\frac{1}{2}$ " en las tapas y coples estos estando unidos como se muestra (Figura D.3), también se perforó un coplee, cabe señalar que se utilizaron las abrazaderas para localizar los puntos de perforación.

**NOTA:** Se deben Identificar cuidadosamente los puntos antes de perforar la tapa y el cople, puesto que uno de ellos tanto la tapa como el cople solo tienen una perforación, se recomienda analizar y entender el modelo completo que es mostrado en al final de este apartado.



Figura D.3: Perforación de cople y tapa.

3. Se pegaron los coples con su respectiva tapa, posteriormente de realizar la fusión, los tubos previamente cortados se taladraron utilizando la tapa ya unida para identificar donde será perforado, es importante no pegarlos y taladrar puesto que se debe evitar que en el interior del cuantificador quede rebaba de PVC, porque extraer el residuo sería complicado (Figura D.4).



Figura D.4: Marcado de puntos.

4. Se pegaron las tapas previamente unidas con el cople en los extremos de los dos tubos de 1 m y 50 cm, posteriormente se colocaron las abrazaderas hidrotoma (Figura D.5).



Figura D.5: Colocación de abrazaderas hidrotoma.

5. Se colocaron todos los adaptadores macho con cinta teflón en las abrazaderas (Figura D.6), si se requiere se puede utilizar una pinza de cadena para la inserción aunque no es del todo indispensable.



Figura D.6: Colocación de adaptadores macho.

6. Se introdujo el adaptador de inserción en la manguera transparente esta fue enroscada en los adaptadores hembra, se coloca primero en el adaptador antes de pegar porque si se enrosca al final será imposible su colocación.

**NOTA:** Presenta todos los accesorios antes de pegarlos, corta pequeños tubos de  $\frac{1}{2}$ " para la unión de los accesorios, todos deben de quedar juntos uno con otro (Figura D.7)

después de tener todo listo ya se puede pegar todo.



Figura D.7: Ensamblado de accesorios.

7. En la Figura D.8 se muestran terminados los pasos que anteriormente se han descrito en el punto 6.



Figura D.8: Cuantificador construido al 80 %.

8. A continuación se colocaron las válvulas esfera de  $\frac{1}{2}$ " en el cuantificador las cuales su función es permitir el paso del biogás, retener agua desplazada y finalmente el drenado del cuantificador (Figura D.9).

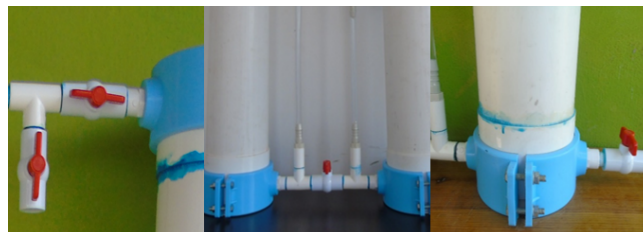


Figura D.9: Colocación de válvulas.

9. Con la unión de las válvulas al sistema de cuantificación, la última parte que se realizó fue probar que no existieran fugas, para ello se realizó una prueba llenando el cuantificador

con agua para verificar que no existiera filtración de líquido, en caso de que las tuviera, se recomienda drenar el sistema dejarlo secar y colocar más cemento para PVC de tal manera que este penetre y selle donde este la fuga. Una vez realizada la inspección y todo el sistema funcione correctamente puede ser instalado, en la Figura D.10A se observa el cuantificador de biogás terminado e instalado junto con una vista de las piezas del sistema (Figura D.10B).

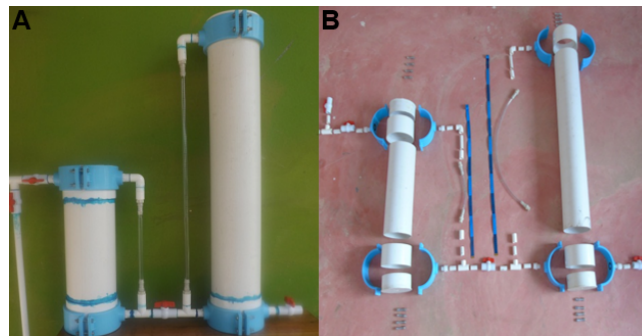


Figura D.10: Cuantificador de biogás: (A) instalado y (B) piezas que conforman el sistema.

#### NOTAS:

- Se utilizan 6 abrazaderas para hidrotoma porque dos de ellas se utilizan las partes que tienen orificio y se unen.
- Se utilizan los coples ya que son necesarios para colocar las tapas en los extremos de los dos tubos, debido a que sin ellos las tapas no embonarían con los tubos.



# Apéndice E

## Calibración del pH-metro marca Bante 920

1. Para iniciar la calibración del pH-metro marca BANTE modelo 920 se vacía el contenido de la solución buffer 7.00 en un matraz volumétrico con un aforo de 250 ml.
2. Posteriormente se añade 60 ml de agua destilada sin llegar hasta la línea del aforo.
3. Se agita constantemente hasta que el polvo de la solución buffer 7.00 quede completamente disuelto.
4. Se añade agua destilada nuevamente hasta llegar a la línea del aforo.
5. Se guarda la solución buffer 7.00 preparada en un frasco plástico o vidrio con tapa.
6. Para preparar las soluciones buffer 4.01 y 10.01 se repiten los pasos que se realizaron para la solución buffer 7.00.
7. En tres vasos precipitados se vacíaN 40 ml de las soluciones *buffer*, una en cada vaso.
8. Encender el pH-metro presionando la tecla MEAS por 3 segundos, sacar el electrodo de la solución de almacenamiento y enjuagarlo con agua destilada.
9. Pulsar la tecla CAL y sumergir el electrodo en la solución *buffer* 7.00, posteriormente presiona la tecla ENTER para confirmar la calibración entonces el indicador empezará a parpadear, el pH-metro, indicará cuando ya esté lista la primer calibración y automáticamente aparecerá CAL2 para iniciar con el segundo punto de calibración.

10. Enjuaga el electrodo con agua destilada e introducirlo en la solución buffer pH10.01. El indicador de calibración empezará a parpadear y en la pantalla aparecerá CAL3 esto indica que la calibración del punto 2 ya fue terminada.
11. Vuelve a enjuagar el electrodo con agua destilada y sumérgelo en la solución buffer pH 4.01, igual que la anterior el indicador de calibración empezará a parpadear y en la pantalla aparecerá END indicando que la calibración esta completada.
12. Finalmente el electrodo se enjuaga con agua destilada y se introduce en la solución de almacenamiento.
13. Si el medidor de pH no se va utilizar en ese momento pulsar la tecla MEAS para apagar el equipo.

NOTA: Sólo se utiliza la cantidad necesaria de solución buffer para que el electrodo se mantenga sumergido durante la calibración, terminada la calibración la solución utilizada deberá ser desechada puesto que no se puede regresar al recipiente contenedor.

# Bibliografía

- [1] Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- [2] Diagnóstico general de la situación de los sistemas de biodigestión en México., 2011.
- [3] Informe sobre la participación de energías renovables al 31 de diciembre de 2014. Technical report, Secretaría de Energía., 2015.
- [4] Gibrán S. Alemán-Nava, Victor H. Casiano-Flores, Diana L. Cárdenas-Chávez, Rocío Díaz-Chavez, Nicolae Scarlat, Jürgen Mahlknecht, Jean-Francois Dallemand, and Roberto Parra. Renewable energy research progress in mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:140 – 153, 2014.
- [5] I Angelidaki and B.K Ahring. Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. *Water Research*, 28(3):727 – 731, 1994.
- [6] Avicenna, Maizirwan Mel, Sany Izan Ihsan, and Roy Hendroko Setyobudi. Process improvement of biogas production from anaerobic co-digestion of cow dung and corn husk. *Procedia Chemistry*, 14:91 – 100, 2015.
- [7] Adriá. Bosch Martí. *Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero*. PhD thesis, Universidad de Catalunya, 2011.
- [8] Grzegorz Brudecki, Reda Farzanah, Iwona Cybulska, Jens E. Schmidt, and Mette H. Thomsen. Evaluation of composition and biogas production potential from seagrass (*Halodule uninervis*) native to Abu Dhabi. *Energy Procedia*, 75:760 – 766, 2015.
- [9] Alfonso Buekens. Energy recovery from residual waste by means of anaerobic digestion technologies. page 15, Luxemburg, 2005. *Energy Recovery from Residual Waste*.

- [10] F.J. Callaghan, D.A.J. Wase, K. Thayanithy, and C.F. Forster. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*, 22(1):71 – 77, 2002.
- [11] Antonia. Campos Pozuelo. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. PhD thesis, Universitat de Lleida, 2001.
- [12] L. Carrillo. *Microbiología agrícola*, chapter Rumen y biogás. Universidad Nacional de Salta, 2003.
- [13] Y.A. Cengel and M.A. Boles. *Termodinámica*. Mc Graw Hill, 2002.
- [14] K.J. Chae, Am Jang, S.K. Yim, and In S. Kim. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, 99(1):1 – 6, 2008.
- [15] Ye Chen, Jay J. Cheng, and Kurt S. Creamer. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10):4044 – 4064, 2008.
- [16] Antonio Colmenar Santos, Roque Calero Pérez, Jose Antonio Carta González, and Manuel Alonso Castro Gil. *Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, 2009.
- [17] Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social CONEVAL, 2014.
- [18] L. Cortsen, M. Lassen, and H. K. Nielsen. Evaluation of small scale biogas digesters in turiani, nronga and amani, tanzania. pages 215–224, Frederiksberg, Denmark, 1997. DSR-Forlag.
- [19] Al costa. *Biomasa y biocombustibles*. Madrid, 2013.
- [20] J. Coto, J. Maldonado, R. Botero, and J. Murillo. Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EART. *Tierra Tropical*, 2(3):217–226, 2007.
- [21] Iñiguez Covarrubias and Camacho López. Evaluación de un reactor de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) con cambios de velocidad de alimentación . *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, XII:199–208, 2011.

- [22] M. Díaz Piñón. Eliminación del sulfuro de hidrógeno en el biogás.
- [23] Secretaría de economía. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- [24] B. Drogg. Process monitoring in biogas plants. *IEA BIOENERGY*, pages 6–38, 2013.
- [25] Alexander Eaton, Rachel Smith, Mariela Pino Donoso, and Sarah Renteria. *Manual para la implementación de proyectos de captura de metano emitido por la agricultura y ganadería en México*, 2014.
- [26] AquaLimpia Engineering e.K. Control de proceso en biodigestores, 2013.
- [27] AQL Engineering Biogas Equipment.
- [28] Neín. Farrera Vázquez. *Tecnologías termosolares y bioenergéticas y su contribución al desarrollo sustentable de comunidades rurales marginadas de Chiapas*. PhD thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2011.
- [29] Ivet Ferrer, Marianna Garfí, Enrica Uggetti, Laia Ferrer-Martí, Arcadio Calderon, and Enric Velo. Biogas production in low-cost household digesters at the peruvian andes. *Biomass and Bioenergy*, 35(5):1668 – 1674, 2011.
- [30] César. Gómez Beltrán. *Desarrollo de un sistema para acondicionar y presurizar biogás*. PhD thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2014.
- [31] María E. González-Sánchez, Sergio Pérez-Fabiel, Arnoldo Wong-Villarreal, Ricardo Bello-Mendoza, and Gustavo Yañez-Ocampo. Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3):229 – 235, 2015.
- [32] Jaime González Velasco. *Energías Renovables*. Reverté, 2009.
- [33] Kaare Hvid Hansen, Irimi Angelidaki, and Birgitte Kiær Ahring. Improving thermophilic anaerobic digestion of swine manure. *Water Research*, 33(8):1805 – 1810, 1999.
- [34] F.R. Hawkes, A.J. Guwy, A.G. Rozzi, and D.L. Hawkes. A new instrument for on-line measurement of bicarbonate alkalinity. *Water Research*, 27(1):167 – 170, 1993.
- [35] Juan Antonio Villanueva Hernandez, Hugo Antonio Nájera Aguilar, José Manuel Gómez Ramos, Tania Geraldine Hernández Lárraga, and Alexis Fanuel Velazco Ortiz. Generación,

caracterización y uso del biogás, producto de la digestión anaerobia de las excretas de ganado bovino. *Lacandonia*, 5(2):149–158, 2011.

- [36] Jorge Hilbert. *Manual para la producción de biogás*, 2006.
- [37] M. Ibañez Plana, J. Rosell Polo, and J. I. Rosell Urrutia. *Tecnología Solar*. Madrid, 2011.
- [38] Salma A. Iqbal, Shahinur Rahaman, Mizanur Rahman, and Abu Yousuf. Anaerobic digestion of kitchen waste to produce biogas. *Procedia Engineering*, 90:657 – 662, 2014.
- [39] Azeem Khalid, Muhammad Arshad, Muzammil Anjum, Tariq Mahmood, and Lorna Dawson. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8):1737 – 1744, 2011.
- [40] Jung Kon Kim, Baek Rock Oh, Young Nam Chun, and Si Wouk Kim. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 102(4):328 – 332, 2006.
- [41] K. Komemoto, Y.G. Lim, N. Nagao, Y. Onoue, C. Niwa, and T. Toda. Effect of temperature on vfa's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste. *Waste Management*, 29(12):2950 – 2955, 2009.
- [42] Anil Kumar, Nitin Kumar, Prashant Baredar, and Ashish Shukla. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in india. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45:530 – 539, 2015.
- [43] M. Levin and M. Gealt. *Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos Selección, estimación, modificación de microorganismos y aplicaciones*. McGraw-Hill, 1997.
- [44] D. Liebetrau, J. and Pfeiffer and D. Thran. *Messmethoden-sammlung Biogas-Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozess beschreibenden Parametern im Biogasbereich*, 2012.
- [45] U. Lossie and P. Pütz. *Targeted control of biogas plants with the help of FOS/TAC*, 2011.
- [46] Ana Madrid Cenzano, Luis Esteire Gereca, Eva Esteire, Antonio Madrid Vicente, Estíbaliz Cenzano del Castillo, and Javier Madrid. *Formación profesional en energías renovables*. Editor Antonio Madrid Vicente, 2015.

- [47] R. Magaña, Luis J., Ernestina Torres R., Martín T. Martínez G., and Carmen Sandoval Juárez. Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras. *Acta Universitaria*, 16:27–37, 2006.
- [48] Jaime Martí Herrero. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*, 2008.
- [49] Omar Masera Cerutti. *La bioenergía en México: un catalizador del desarrollo sustentable*. Red Mexicana de Bioenergía, 2006.
- [50] McCarty, P.L. *Anaerobic waste treatment fundamentals*, 1964.
- [51] Janet McKennedy and Orla Sherlock. Anaerobic digestion of marine macroalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52:1781 – 1790, 2015.
- [52] M. Menna, J. Branda, G. Murcia, E. Garín, G. Belliski, and E. Moschione. Metodología de bajo costo para la cuantificación de biogás en biodigestores de laboratorio. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 11:107–113, 2007.
- [53] Joel Moreira Acosta, 2015.
- [54] Rafał Mulka, Wiesław Szulczewski, Józef Szlachta, and Mariusz Mulka. Estimation of methane production for batch technology – a new approach. *Renewable Energy*, 90:440 – 449, 2016.
- [55] Linus Naik, Zenebe Gebreegziabher, Vianney Tumwesige, Bedru Babulo Balana, Jecinta Mwirigi, and Greg Austin. Factors determining the stability and productivity of small scale anaerobic digesters. *Biomass and Bioenergy*, 70:51 – 57, 2014.
- [56] Marta Oleszek, Aleksandra Król, Jerzy Tys, Mariusz Matyka, and Mariusz Kulik. Comparison of biogas production from wild and cultivated varieties of reed canary grass. *Bioresource Technology*, 156:303 – 306, 2014.
- [57] Jairo Alexander Osorio, Héctor José Ciro Velásquez, and Hugo González Sánchez. Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 60(2):4145–4162, 2007.
- [58] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) .

- [59] G. Pedraza, J. Chará, N. Conde, S. Giraldo, and L. Giraldo. Evaluation of polyethylene and pvc tubular biodigesters in the treatment of swine wastewater. *Livestock Research for Rural Development*, 14(1):1–18, 2002.
- [60] M. Pérez Martínez, M. Cuestas Santianes, S. Nuñez Crespí, and J. Cabrera Jiménez. Utilización de biogas en pilas de combustible, 2008.
- [61] Åsa Hadin and Ola Eriksson. Horse manure as feedstock for anaerobic digestion. *Waste Management*, 56:506 – 518, 2016.
- [62] P.L. Servian, E. Martínez, and R. Botero. Evaluación del tratamiento anaeróbico de aguas residuales ordinarias de la universidad earth para su aprovechamiento energético. *Tierra Tropical*, 5(1):95–101, 2009.
- [63] V.K Sharma, C Testa, G Lastella, G Cornacchia, and M.P Comparato. Inclined-plug-flow type reactor for anaerobic digestion of semi-solid waste. *Applied Energy*, 65(1–4):173 – 185, 2000.
- [64] Berlian Sitorus, Sukandar, and Seno D. Panjaitan. Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes. *Energy Procedia*, 32:176 – 182, 2013.
- [65] Li Sun, Bettina Müller, and Anna Schnürer. Biogas production from wheat straw: community structure of cellulose-degrading bacteria. *Energy, Sustainability and Society*, 3(1):15, 2013.
- [66] A. Trinidad Santos. Utilización de estiércoles. Technical report, SAGARPA.
- [67] Juan Carlos Vega de Kuyper and Santiago Ramírez Morales. *Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones*. Alfaomega, 2014.
- [68] E. Voss, D. Weichgrebe, and K. Rosenwinkel. FOS/TAC-Deduction Methods Application and Significance Internationale Wissenschaftskonferenz. *LfL-Bayern*, pages 2–4, 2009.
- [69] Joaquín A. Viquez Arias. Remoción del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S (g) ) / ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S (aq) ) en el biogás. *ECAG Informa*, (53):16–20, 2010.
- [70] Jesús Ángel Vázquez Minguela and Francisco Sánchez Godoy. *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*, chapter Digestión anaerobia para la producción de biogás. Mundi Prensa, 2015.



- [71] Alastair J. Ward, Phil J. Hobbs, Peter J. Holliman, and David L. Jones. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17):7928 – 7940, 2008.
- [72] Alastair J. Ward, Phil J. Hobbs, Peter J. Holliman, and David L. Jones. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17):7928 – 7940, 2008.
- [73] Peter Weiland. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4):849–860, 2010.
- [74] Tong Zhang, Yuheng Yang, Linlin Liu, Youyang Han, Guangxin Ren, and Gaihe Yang. Improved biogas production from chicken manure anaerobic digestion using cereal residues as co-substrates. *Energy Fuels*, 28(4):2490–2495, 2014.