

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LAS EXCRETAS DEL GANADO
LECHERO EN CONDICIONES DE LABORATORIO

POR:

GIADA CAROLA ROCCHI MANTILLA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LAS EXCRETAS DEL GANADO
LECHERO EN CONDICIONES DE LABORATORIO

POR:

GIADA CAROLA ROCCHI MANTILLA

Que somete al H. Jurado Examinador como requisito parcial para
obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada
El Presidente del Jurado

Dra. Manuela Bolívar Duarte
Asesora Principal

MC. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coasesor

DR. Luis Samaniego Moreno
Coasesor

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"

Coordinador de la de División de Ingeniería

MC. Luis Rodríguez Gutiérrez



Coordinación de

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO
DICIEMBRE 2012

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecerle a mi *Alma Terra Mater* por brindarme la oportunidad de superarme y forjarme como profesionista.

A todos los integrantes del Departamento de Riego y Drenaje por compartir sus conocimientos, experiencias y otorgarme su confianza. Gracias por su amistad y el tiempo que me dedicaron durante el transcurso la carrera.

A la Dra. Manuela Bolívar Duarte por ser mi guía y ejemplo como mujer y amiga, así mismo por apoyarme en la elaboración de esta tesis.

A mis asesores el Dr. Luis Samaniego y al MC. Luis Rodríguez Gutiérrez por su disposición, observaciones y comentarios en este trabajo.

A Q.F.B. Ana Paola Moreno Garza por su paciencia, tiempo y asesorías en el laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje.

Quiero agradecer a todas las personas que me ofrecieron su apoyo incondicional y comprensión en esta Universidad y en Querétaro, que en el transcurso de los días se convirtieron en mis amigos/as y que ahora son mi familia.

DEDICATORIAS

A mi familia Rocchi Mantilla:

Este desafío que he superado en mi vida, se concretó con el apoyo incondicional de mis padres Verónica y Fernando y mis queridos hermanos Enrico y Ferdinando.

Les agradezco que sean mi guía y fortaleza, por brindarme su amor, paciencia y sabios consejos, por el impulso y sacrificio realizado que me permite crecer como individuo y profesionalista.

Mis esfuerzos han sido inspirados por cada uno de Ustedes.

Por todo el ayer, les dedico todo mi mañana.

“LOS AMO”

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Cambio Climático.....	4
2.1.2. El Efecto Invernadero	5
2.2. Metano como Gas Invernadero	8
2.2.1. Fuentes de Emisión del Metano	9
2.2.2. Emisiones de Metano desde el Proceso Digestivo.....	9
2.2.3. Emisiones de Metano desde la Descomposición Anaerobia del Estiércol.....	11
2.2.4. Procesos de Biodigestión	12
2.2.4.1. Digestión aerobia	12
2.2.4.2. Digestión Anaerobia	14
2.2.4.2.1. Fermentación Anaerobia.....	15
2.2.4.2.2. Respiración Anaerobia.....	16
2.3. Productos Finales de la Digestión Anaerobia	18
2.3.1. Biogás como Producto de la Digestión Anaerobia.....	18
2.3.2. Características Generales del Biogás	18
2.3.3. Equivalentes para la Producción de Biogás	18
2.3.4. Producción de Biogás en Laboratorio.....	19
2.3.5. Usos y Beneficios del Biogás	21
2.4. Factores determinantes en la Producción de Biogás.....	22
2.4.1. La Temperatura	23
2.4.2. Tipo de Materia Prima o Sustrato	24
2.4.3. El pH.....	26
2.5. El Efluente como Producto de la Digestión Anaerobia	27

2.5.1. Agua Residual para Reúso Agrícola.....	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1. Localización del Sitio de Muestreo	30
3.2. Procedimiento de Muestreo	31
3.2.1. Muestreo Manual.....	31
3.3. Métodos empleados para el Muestreo y Preparación de las Muestras ..	32
3.3.1. Materiales y Métodos	32
3.3.2. Parámetros de Observación.....	33
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
V. CONCLUSIONES.....	48
VI. LITERATURA CITADA	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Emisiones de GEI por sector en México (SEMARNAT, 2010).....	7
Figura 2.2. Evolución de emisiones de GEI en México (INE, 2006).....	7
Figura 2.3. Fermentación anaerobia de glucosa en etanol (Varnero, 2011).	16
Figura 2.4. Respiración anaerobia de la glucosa (Varnero, 2011).....	17
Figura 2.5. Biodigestor anaerobio ARMFIRLELD W8.	21
Figura 3.1. Localización del sitio de muestreo.	30
Figura 4.1. Producción de Biogás diario a 37°C, 45°C y 50°C.	35
Figura 4.2. Ajuste polinomial de la producción diaria de biogás a 37°C.....	36
Figura 4.3. Ajuste polinomial de la producción diaria de biogás a 45°C.....	36
Figura 4.4. Ajuste polinomial de la producción diaria de biogás a 50°C.....	37
Figura 4.5. Producción de biogás acumulado de las digestiones con sus respectivas temperaturas.....	38
Figura 4.6. Relación de los sólidos totales volátiles y la producción de biogás total a 37°C.	39
Figura 4.7. Relación de los sólidos totales volátiles y la producción de biogás total a 45°C.	40
Figura 4.8. Relación de los sólidos totales volátiles y la producción de biogás total a 50°C.	41

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Características del biogás (Deublein y Steinhauser, 2008).....	19
Cuadro 2.2. Recursos para la producción de biogás (Ramírez, 2010).	19
Cuadro 2.3. Rangos de temperatura en los que trabajan los microorganismos (Lagrange, 1979).	24
Cuadro 2.4. Residuos orgánicos de diferentes orígenes (Varnero y Arellano, 1990).....	25
Cuadro 2.5. NOM-003-SEMARNAT-1996: Límites Máximos Permisibles para contaminantes básicos (DOF, 1997).....	28
Cuadro 2.6. NOM-001-ECOL-1996: Límites Máximos Permisibles para contaminantes básicos (DOF, 1996).....	29
Cuadro 3.1. Parámetros y métodos físico-químico-biológicos del influente y efluente.....	33
Cuadro 4.1. Parámetros físico-químico-biológicos del influente y efluente de las excretas líquidas de ganado bovino a diferentes temperaturas.	34
Cuadro 4.2. Valores de la media, varianza y número de observaciones de las digestiones a 37°C, 45°C y 50°C.	37
Cuadro 4.2. Coeficiente de correlación entre los STV y el biogás en la digestión a 37 °C.....	40
Cuadro 4.3. Coeficiente de correlación entre los STV y el biogás en la digestión a 45 °C.....	41
Cuadro 4.4. Coeficiente de relación entre los STV y el biogás en la digestión a 50 °C.....	42
Cuadro 4.5 Parámetros físico-químicos comparados con los de la NOM-001- ECOL-1996 (DOF, 1996).....	43
Cuadro 4.6. Parámetros físico-químico-biológicos comparados con los de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997).....	44
Cuadro 4.7. Parámetros Agronómicos del Efluente de las Digestiones a 37°C, 45°C y 50°C (Castellanos y Uvalle, 2000).....	47

RESUMEN

La agricultura y la producción pecuaria contribuyen ampliamente a las emisiones antropogénicas de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso a la atmósfera. Estas emisiones son conocidas como gases de efecto invernadero (GEI). La actividad ganadera produce entre 15 y 20 por ciento de la emisión mundial de gas metano (Moss *et al.*, 2000 y Moss y Givens, 2002). El ganado emite este gas a la atmósfera debido a la presencia de bacterias metanogénicas en el proceso digestivo de los rumiantes y en las excretas del ganado, causando problemas a su manejo y disposición.

Para reducir la emisión de metano por parte del sector pecuario se propone utilizar la digestión anaerobia de las excretas del ganado lechero, teniendo como resultado biogás y un efluente que podría reusarse para riego agrícola. Se requiere mostrar la factibilidad de esta propuesta, por lo que se produjo biogás a partir de las excretas del ganado bovino en condiciones de laboratorio.

Cada muestra (excreta líquida) fue sometida a una digestión con diferente temperatura. Para determinar cuál de ellas produjo mayor cantidad de biogás, se elaboró una comparación de medias; para ello se tomaron tres muestras del establo en las siguientes fechas con su respectiva temperatura: 08 de noviembre de 2011 a 37 °C; 20 de abril de 2012 a 45 °C y 21 de mayo de 2012 a 50 °C. Las excretas líquidas fueron colocadas en un biodigestor anaerobio ARMFIRLED W8 en las fechas mencionadas por un periodo aproximado de 30 días.

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales factores en la intervención de la generación de biogás, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaerobia y crecimiento de las bacterias metanogénicas (Mata-Álvarez, 2003). Se corrobora lo mencionado teniendo como resultado que la digestión a 50 °C produce mas biogás con una mayor velocidad de reacción y menor tiempo de retención.

La presencia de los sólidos varía según el sustrato empleado en la digestión (Varnero y Arellano, 1990). Los STV contienen componentes orgánicos de fácil degradación, los que teóricamente deben ser convertidos a metano (Silva, 2002). Se encontró una correlación positiva entre los sólidos totales volátiles y la generación de biogás, se traduce que a mayor cantidad de STV mayor producción de biogás.

El influente y efluente fueron sometidos a los siguientes parámetros de observación pH, CE, ST, SST, STV, DBO₅, DQO, NTK, CF y CT. Para determinar si el efluente es apto para riego agrícola estos parámetros se comparan con la NOM-001-ECOL-1996 máximos límites permisibles de contaminantes con las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y la NOM-003-SEMARNAT-1997 máximos límites permisibles para uso de riego en parques y jardines (contacto directo) y en la agricultura (contacto indirecto); el único parámetro que cumple con los rangos de las normas son los CF.

Los efluentes de cada digestión también se le realizaron los parámetros agronómicos pH, CE, calcio, magnesio, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sodio, sulfatos, SE, SP, RAS, CRS y PSP; según Castellanos y Uvalle (2000) el efluente en su mayoría tiene restricciones “no recomendable” y “condicionada”.

Los parámetros físico-químico-biológicos no cumplen con los rangos establecidos por las normas oficiales mexicana mencionadas ni con Castellanos y Urvalle (2000); para que estos parámetros cumplan, es necesario prolongar el periodo de retención celular.

Sin embargo, desde el punto de vista biológico el que no cumplan con dichos parámetros se traduce en que hay una gran cantidad de materia orgánica, que para el campo esto no es una restricción sino un beneficio para los cultivos.

La calidad del efluente es C₃S₁, considerada alta en sales y baja en sodio, debe de aplicarse con precaución y emplear en cultivos tolerantes a la salinidad.

Con los resultados obtenidos, se cumplieron los objetivos específicos porque se generó biogás a partir de las excretas del ganado bovino y se demostró la factibilidad de reusar el efluente para riego agrícola.

Palabras clave: digestión anaerobia, aguas residuas, sólidos totales volátiles, temperatura y biogás.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico implica la necesidad de disponer de recursos hídricos, mismos que son escasos a nivel mundial, pero sobre todo en lugares de clima árido y semiárido. Dicha situación ha llevado a potenciar el ahorro del agua, así como a la reutilización de las aguas residuales en diversas actividades, siendo la agricultura una de las más significativas por la gran demanda de este recurso.

Así mismo, el incremento en el costo de fertilizantes químicos y la contaminación de los recursos suelo, agua y aire provocado por las actividades ganaderas, conducen al aprovechamiento integral de los productos del tratamiento de las aguas residuales.

La agricultura y la producción pecuaria contribuyen ampliamente a las emisiones antropogénicas de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera.

La actividad ganadera produce entre 15 y 20 por ciento de la emisión mundial de gas metano (Moss *et al.*, 2000 y Moss y Givens, 2002). El ganado emite este gas a la atmósfera debido a la presencia de bacterias metanogénicas en el proceso digestivo; así como las excretas de los animales

domésticos que también generan GEI (Gases Efecto Invernadero) causando problemas a su manejo y disposición.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2011) Coahuila ocupa el segundo lugar nacional en la producción de leche con 638´875,000 litros incluyendo a los sistemas con infraestructura tecnificada o semitecnificada que es el caso de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Cada uno de estos sistemas se basa en el aprovechamiento de diferentes recursos naturales, tecnológicos, económicos, administrativos y de fuerza laboral, que requieren ser optimizados para aminorar los problemas de contaminación y desequilibrio ecológico; representando una alternativa a la solución integral para el tratamiento de los residuos ganaderos.

Por lo anterior, los objetivos planteados son:

1.1. Objetivo General

Mostrar la factibilidad de utilizar la digestión anaerobia en la producción de biogás como una alternativa para optimizar el manejo de excretas, presentar la viabilidad de reutilizar el agua residual para uso agrícola y así reducir riesgos de contaminación ambiental en pequeñas explotaciones lecheras.

1.2. Objetivos Específicos

- Generar biogás a partir de excretas del ganado bovino de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en condiciones de laboratorio.
- Determinar la calidad y factibilidad de reutilizar el agua tratada para riego.

1.3. Hipótesis

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados (bacterias metanogénicas), que a su vez dependen de la temperatura.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Cambio Climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC,1992) define el "cambio climático" como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

De manera general, los cambios en el clima del planeta se dan porque la Tierra absorbe la radiación del Sol, sobre todo en la superficie del planeta. Esta energía es redistribuida luego por las circulaciones atmosférica y oceánica, y es irradiada nuevamente al espacio en longitudes de onda infrarroja más largas. La temperatura media anual de la Tierra se equilibra entre la energía de la radiación solar que ingresa y la radiación terrestre saliente. Cualquier factor que altere la radiación solar que entra al planeta o la salida de la radiación infrarroja al espacio, o que altere la redistribución de energía dentro de la atmósfera y entre atmósfera, tierra y océano, puede afectar el balance y producir un cambio climático global.

2.1.2. El Efecto Invernadero

La Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010), menciona que la atmósfera terrestre es una delgada película constituida por una masa gaseosa de composición prácticamente homogénea y especialmente sensible desde el punto de vista termodinámico a los cambios de concentración de bióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI). La atmósfera constituye uno de los principales bienes ambientales globales, producto de la evolución de la vida en el planeta e indispensable para la continuidad de la misma. A mayor concentración de GEI en la atmósfera, mayor la opacidad de ésta a la radiación infrarroja que emite la superficie terrestre al calentarse por la radiación solar, y mayor el efecto invernadero.

El efecto invernadero natural mantiene la superficie terrestre 33 °C por encima de la temperatura promedio que tendría con una atmósfera de composición igual a la actual, pero sin la muy pequeña presencia de GEI. Muchas actividades antropogénicas, en particular aquéllas que implican la quema de combustibles fósiles o la destrucción de la vegetación natural, han impulsado la creciente incorporación a la atmósfera de cantidades adicionales de GEI, que dan lugar al proceso de cambio climático de tipo antropogénico (Cárdenas, 2010).

El mismo autor indica que la presencia humana y sus actividades, fundadas en patrones de consumo inéditos y en el uso generalizado de los combustibles fósiles, ha logrado así, en un lapso de décadas, transformaciones

climáticas de una magnitud superior a las que el sistema natural experimentó en el transcurso de muchos miles de años.

Los principales gases de efecto invernadero son:

- Bióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- Ozono (O₃)
- Vapor de agua

En la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC-2005), participan 194 países como miembros, México se localizaba en la intersección de los conjuntos constituidos por los 25 países con mayor población, mayor producto interno bruto (PIB) y mayores emisiones (se consideran sólo emisiones de CO₂ por quema de combustibles fósiles).

En el contexto mundial, México contribuye con alrededor del 1.6 por ciento a las emisiones de GEI, que en el 2006 éstas fueron de 715 millones de toneladas de CO₂ (M tCO₂e); en la figura 2.1 se muestran las emisiones de GEI en nuestro País por sector.

En el rango de países emisores, México se ubica en la posición número 13; sus emisiones per cápita en 2006, ascendieron a 6.2 tCO₂, y sin incluir la categoría de Uso de Suelo y Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura, (USCUSS) fueron de 5.9 tCO₂. En la figura 2.2 muestra el cambio de las emisiones GEI en México por año.

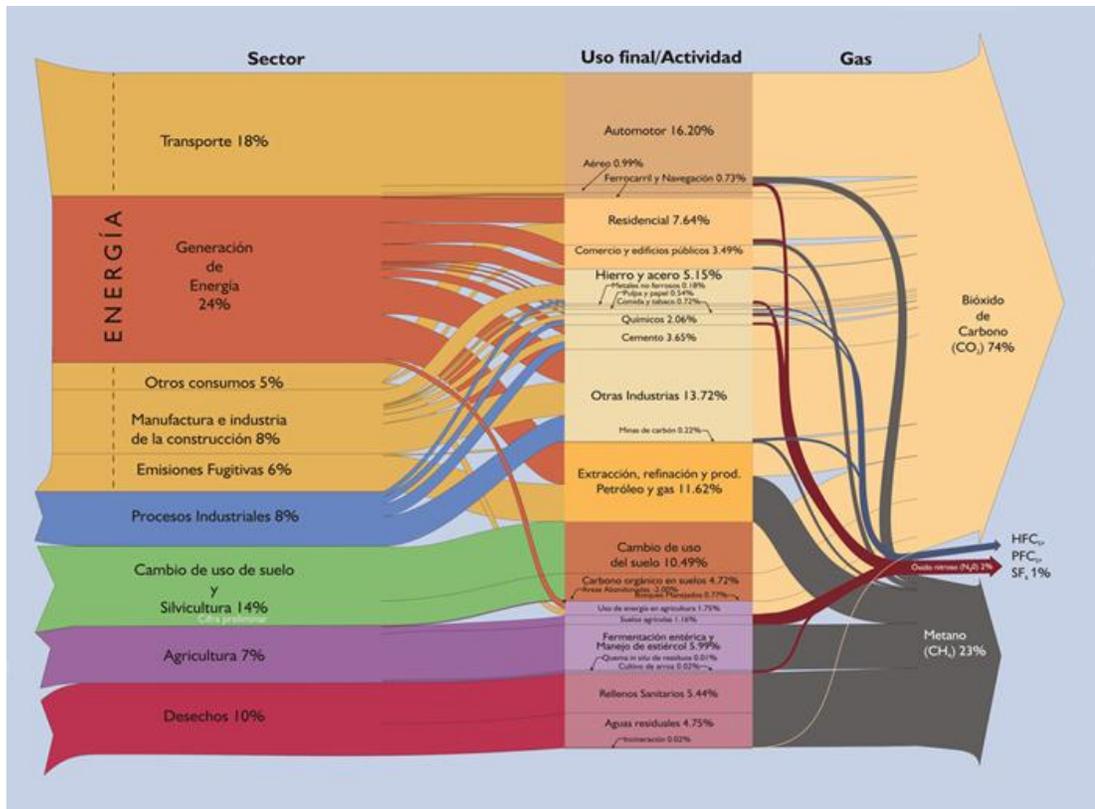


Figura 2.1. Emisiones de GEI por sector en México (SEMARNAT, 2010).

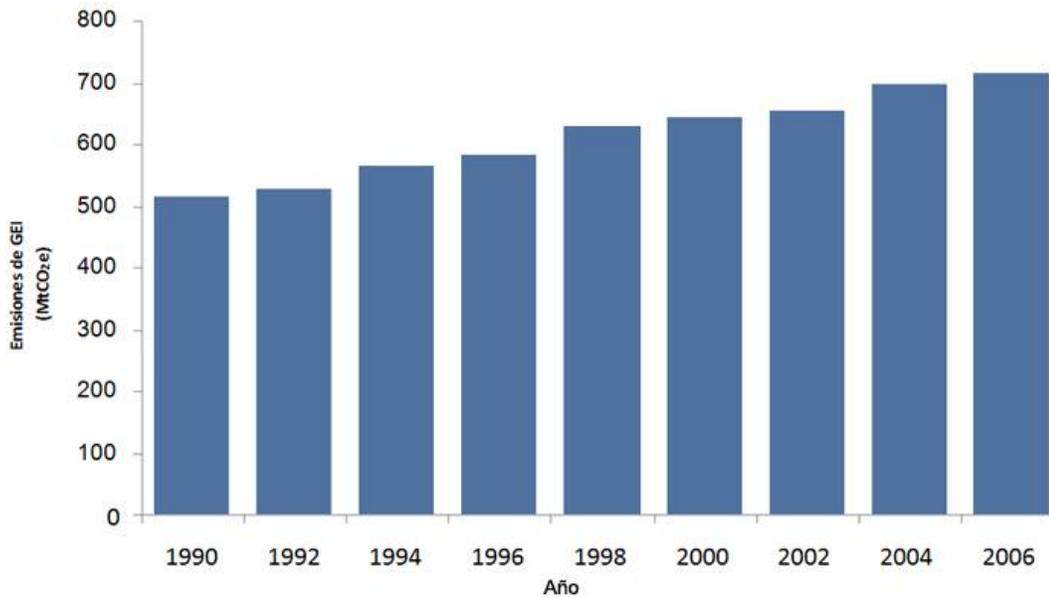


Figura 2.2. Evolución de emisiones de GEI en México (INE, 2006).

México firmó la CMNUCC en 1992, el mismo año en que se adoptó, y una vez aprobada por el Senado de la República, ratificó este instrumento en 1993. Firmó el Protocolo de Kioto (PK) en 1997, el mismo año de su adopción y, una vez aprobado por el Senado, lo ratificó en el año 2000.

2.2. Metano como Gas Invernadero

Según Campos (2001), el metano alcanzó una especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Con el fin de la guerra y la fácil disponibilidad de combustibles fósiles, la mayoría de las instalaciones fueron cesando en su funcionamiento. Sin embargo, en India, a comienzos de la década de los 60, se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble propósito del aprovechamiento energético y la obtención de un biofertilizante. En China, a inicios de la década de los 70, se ha fomentado la construcción de digestores, mediante programas de ámbito nacional. En los países industrializados la historia de la tecnología de biodigestión ha sido diferente y el desarrollo ha respondido más bien a motivaciones medioambientales que puramente energéticas, constituyendo un método clásico de estabilización de lodos activos de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias. Durante la década de los 80, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales. Sin embargo, con la disminución de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer,

aunque en algunos países industrializados se han desarrollado importantes programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial y doméstica.

Levine (1994), define al metano como un gas invernadero que afecta la capa de ozono en la atmósfera y contribuye al calentamiento global o cambio climático global. Las más grandes fuentes agrícolas de CH₄ son el manejo de rumiantes y la producción de arroz.

2.2.1. Fuentes de Emisión del Metano

El Metano es emitido desde dos fuentes en los sistemas de producción pecuaria (Levine, 1994):

- Desde el proceso digestivo de los animales (fermentación entérica).
- Desde el proceso de descomposición anaerobia en el estiércol animal.

2.2.2. Emisiones de Metano desde el Proceso Digestivo

La producción de metano es parte de los procesos digestivos normales de los animales. Durante la digestión, los microorganismos presentes en el aparato digestivo fermentan el alimento consumido por el animal. Este proceso fermentativo microbiano, conocido como fermentación entérica, produce metano como un subproducto, que puede ser exhalado o eructado por el animal (MDSMA, 1997).

Entre las especies ganaderas, los rumiantes (bovinos, ovinos, caprinos, búfalos, camélidos) son los principales emisores de metano (Reynoso, 2011).

En condiciones normales, los rumiantes son alimentados con forrajes, compuestos por celulosa (Boadi *et al.*, 2004 y Sharma, 2005).

El proceso de fermentación, que tiene lugar en el rumen, ofrece una oportunidad para que los microorganismos desdoblén la celulosa, transformándola en productos que pueden ser absorbidos y utilizados por el animal (Johnson & Johnson, 1995). Estos organismos forman una ecología compleja, que incluye mecanismos de competición y simbiosis. La población de estos organismos es fuertemente influenciada por la composición de la dieta consumida por el animal (Boadi *et al.*, 2004 y Sharma, 2005).

Las bacterias metanogénicas son las responsables de la producción del metano y, si bien constituyen una fracción muy pequeña de la población microbiana total, cumplen una función muy importante, al proveer un mecanismo para eliminar el hidrógeno producido en el rumen (Ramírez *et al.*, 2007).

En los animales no rumiantes (porcinos, equinos, mulares, asnales), la fermentación microbiana ocurre en el intestino grueso, que tiene una capacidad de producción de metano mucho menor que el rumen (MDSMA, 1997).

Sharma (2005), comenta que la producción de metano es el resultado de procesos digestivos, la cantidad emitida varía con el tipo de animal, con la naturaleza, cantidad y digestibilidad del alimento consumido y con el nivel de producción.

La cantidad de metano producida depende enormemente del porcentaje de fibra cruda en la alimentación, mientras más alto el contenido de fibra cruda, más alta la emisión de metano como un porcentaje de la ingesta bruta de energía (Carmona *et al.*, 2005).

Sin embargo, como raciones bajas de fibra cruda son casi siempre combinadas con una mayor ingesta de energía, el efecto por animal es pequeño.

2.2.3. Emisiones de Metano desde la Descomposición Anaerobia del Estiércol

Varnero (2011), menciona que el manejo del estiércol del ganado produce emisiones de metano y de óxido nitroso. El metano se produce mediante la descomposición anaerobia del estiércol, mientras que el óxido nitroso se forma como parte del ciclo del nitrógeno, a través de la denitrificación del nitrógeno orgánico presente en el estiércol y en la orina del ganado.

Cuando el estiércol se dispone en sistemas que promueven las condiciones anaerobias (por ejemplo, en forma líquida en lagunas, tanques o fosas), la descomposición de la materia tiende a producir metano. Cuando el estiércol se maneja en forma sólida (por ejemplo, almacenamiento en pilas) o queda depositado sobre las pasturas y los campos naturales, tiende a descomponerse aerobiamente y produce muy poco o nada de metano. La temperatura y la humedad influyen en el desarrollo de las bacterias responsables de la formación de metano (Levine, 1994).

La composición del estiércol, que depende de la dieta de los animales, también afecta la cantidad de metano producido. Cuanto mayor es el contenido energético y la digestibilidad del alimento, mayor es el potencial de emisión de metano (Boadi *et al.*, 2004 y Sharma, 2005).

2.2.4. Procesos de Biodigestión

El correcto manejo de los residuos orgánicos se logra a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos (Cendales, 2011).

Brock *et al.* (1994) señala que la población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos.

2.2.4.1. Digestión aerobia

La digestión aerobia consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de

oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular (Romero y Jairo, 1994).

En estos procesos los lodos son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la auto oxidación de la materia celular (Metcalf & Eddy, 1997).

Tebbutt (1990), indica que las primeras fases del proceso de digestión aerobia, cuando una población de microorganismos se pone en contacto con una fuente ilimitada de sustrato, los microorganismos se reproducen con una tasa de crecimiento poblacional logarítmico que sólo está limitada por su propia habilidad de reproducirse. La tasa de consumo de oxígeno aumenta rápidamente debido a la absorción y asimilación de materia orgánica para la síntesis de nueva masa protoplasmática.

A medida que progresa la oxidación de la materia orgánica disponible, la tasa de crecimiento bacteriano empieza a disminuir. Las fuentes de carbono orgánico disponibles se hacen limitantes, y por consiguiente, también se presenta una disminución en la tasa de consumo de oxígeno. Cuando la cantidad de materia orgánica disponible es apenas suficiente para garantizar la subsistencia de las distintas especies de microorganismos, éstos comienzan a auto oxidarse mediante su metabolismo endógeno (Torres y Zárate, 1996).

Según el IMTA (1993), la digestión aerobia presenta diversas ventajas dentro de las cuales destacan la facilidad de operación del sistema, bajo capital

de inversión comparada con la digestión anaerobia, no genera olores molestos, reduce la cantidad de coliformes fecales y por lo tanto, de organismos patógenos, produce un sobrenadante clarificado con una baja DBO₅, con pocos sólidos y poco fósforo. El proceso presenta también sus desventajas, entre las que se suele mencionar los altos costos de operación causados por los altos consumos de energía, la falta de parámetros y criterios claros para el diseño y la dificultad que presentan los lodos digeridos aerobiamente para ser separados mediante centrifugación y filtración al vacío.

2.2.4.2. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (Ostrem, 2004). Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90 por ciento de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10 por ciento de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50 por ciento consumido en un sistema aeróbico (Varnero, 2011).

En la digestión anaerobia, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aerobias. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema (Gamrasni, 1985). Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo.

El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación anaerobia o respiración anaerobia dependiendo del tipo de aceptores de electrones.

2.2.4.2.1. Fermentación Anaerobia. En una fermentación anaerobia, la materia orgánica es catabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad. El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. En la fermentación, el sustrato es parcialmente oxidado y por lo tanto, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva (Mah, 1982).

Varnero (2011), muestra en la figura 2.3 la fermentación anaerobia de glucosa en etanol. Es importante destacar que la mayor parte (dos tercios) del metano se produce mediante fermentación anaerobia en el cual el acetato actúa como dador y aceptor de electrones. La producción de metano mediante esta

vía se conoce comúnmente como metanogénesis acetotrófica. La fermentación anaerobia se puede aplicar para la recuperación de biocombustibles (e.g. hidrógeno y butanol) y productos bioquímicos (nisina y ácido láctico).

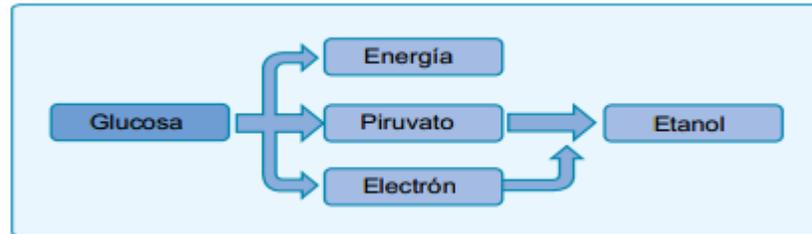


Figura 2.3. Fermentación anaerobia de glucosa en etanol (Varnero, 2011).

2.2.4.2.2. Respiración Anaerobia. La respiración anaerobia es un proceso biológico de oxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica. La realizan exclusivamente algunos grupos de bacterias y para ello utilizan una cadena transportadora de electrones análoga a la de las mitocondria en la respiración aerobia. No debe confundirse con la fermentación, que es un proceso también anaeróbico, pero en el que no participa nada parecido a una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica (Madigan *et al.*, 2003).

La respiración anaerobia requiere aceptores de electrones externos para la disposición de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica (Figura 2.4). Los aceptores de electrones en este caso pueden ser CO_2 , SO_4^{2-} o NO_3^- . La energía liberada es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaerobia.

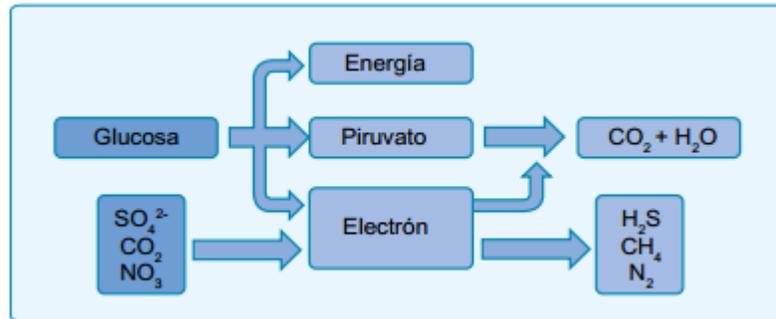


Figura 2.4. Respiración anaerobia de la glucosa (Varnero, 2011).

Cuando el CO_2 acepta los electrones liberados por la materia orgánica, se reduce a gas metano (CH_4). La producción de CH_4 mediante esta vía se conoce como metanogénesis hidrogenotrófica y es responsable de un tercio de la producción total de metano. Ciertos microorganismos anaeróbicos también utilizan el CO_2 como aceptor de electrones y reducen el hidrógeno a ácido acético. La presencia de sulfato en un ambiente anaeróbico desvía parte de la materia orgánica hacia la reducción de sulfato mediante un grupo especializado de bacterias anaerobias conocido como bacterias reductoras de sulfato. La liberación de sulfuro de hidrógeno, gas de olor penetrante, es característico en ambientes anaeróbicos en los cuales el sulfato actúa como aceptor de electrones. Cuando el nitrato (NO_3^-) actúa como aceptor de electrones, se reduce a gas nitrógeno. Este corresponde a un proceso biológico estándar para la remoción de compuestos nitrogenados en las aguas residuales. El grupo de bacterias involucradas en este proceso se conocen como bacterias reductoras de nitrato o desnitrificadoras (Varnero, 2011).

2.3. Productos Finales de la Digestión Anaerobia

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un bioabono que consiste en un efluente estabilizado llamado lodo (Mata-Álvarez J. *et al.*, 2000).

2.3.1. Biogás como Producto de la Digestión Anaerobia

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de bacterias metanogénicas y otros factores, en ausencia de oxígeno.

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45 por ciento es inflamable (Hilbert, 2010).

2.3.2. Características Generales del Biogás

Se pueden observar las propiedades del biogás en el cuadro 2.1.

2.3.3. Equivalentes para la Producción de Biogás

Los datos de relación de los recursos del ganado lechero para la producción de biogás se observan en el cuadro 2.2, así como su equivalencia eléctrica.

Cuadro 2.1. Características del biogás (Deublein y Steinhauser, 2008).

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Cuadro 2.2. Recursos para la producción de biogás (Ramírez, 2010).

GANADO LECHERO
1 lt de leche requiere 1,000 lt de agua
5 kg de excreta/1 lt leche
1 vaca produce 40 - 60 kg/día de excreta
20 vacas produce 1 ton/día
60 lt de biogás/ kg de excreta
Generarían hasta 110 watts/hr.

2.3.4. Producción de Biogás en Laboratorio

Un biodigestor es un contenedor (llamado reactor) el cual está herméticamente cerrado y dentro del cual se deposita material orgánico como excremento y desechos vegetales, y a partir del cual se obtiene un gas

conocido como “biogás”. En el laboratorio se emplea el biodigestor anaerobio ARMFIRLELD W8 como se muestra en la figura 2.5.

Este digestor cuenta con dos reactores de lecho empaquetado y caudal ascendente de cuatro litros y sistemas de control de alimentación y temperatura para lograr una operación continua y estable de hasta siete litros diarios durante varios días.

Los reactores pueden funcionar en serie o en paralelo. Un recipiente separador ubicado entre ambos reactores recibe el fluido excedente del primer reactor si el segundo está operando en serie pero, obviamente, con menor caudal. Unas bombas peristálticas calibradas gradúan y controlan el volumen de caudal hacia los recipientes. La temperatura dentro de cada reactor, cuya distribución se mantiene regulada en un margen de más o menos 0.5 °C, es controlada por una manta calefactora eléctrica que recubre su pared externa. En cada reactor puede regularse la temperatura en forma independiente desde ambiente hasta los 55 °C.

La toma de gas en cada reactor es llevada hasta un colector con calibración volumétrica, que funciona por desplazamiento de agua. Un dispositivo de sellado líquido y altura de carga constante, asegura que la presión del gas del reactor se mantenga a un valor invariable durante el ensayo. El gas recogido puede evacuarse del recipiente y posteriormente, se puede llenar con agua durante otro ensayo sin romper el sello líquido.

Los puntos de muestreo para el líquido y el gas están distribuidos estratégicamente por los reactores. Existen válvulas de retención y sellos líquidos de sifón en las tuberías que aseguran la operación del reactor a un volumen constante evitando asimismo el ingreso de aire o el peligro de alguna acción sifónica accidental.

El equipo está montado sobre una base plástica formada al vacío con un canal de drenaje incorporado para soportar cualquier derrame o agua de lavado.



Figura 2.5. Biodigestor anaerobio ARMFIRLELD W8.

2.3.5. Usos y Beneficios del Biogás

Los sistemas de biogás pueden proveer beneficios a sus usuarios, a la sociedad y al medio ambiente en general:

- Producción de energía (calor, luz, electricidad). El poder calorífico promedio de un metro cúbico de biogás es de cinco mil kilocalorías,

equivalente al 70 por ciento del gas natural, por lo cual su principal aplicación es como energético para cocinar, iluminar, generar calor, operar maquinaria, bombear agua, generar energía eléctrica, etc. (Sánchez, 2005).

- Transformación de desechos orgánicos en fertilizante sólido y/o líquido (Hansson y Chritenson, 2005).
- Mejoramiento de las condiciones higiénicas a través de la reducción de patógenos, huevos de gusanos y moscas y reducción de malos olores (Klübler *et al.*, 1999).
- Beneficios económicos a través de la sustitución de energía y fertilizantes, del aumento en los ingresos y del aumento en la producción agrícola ganadera (IEA, 2002).

2.4. Factores determinantes en la Producción de Biogás

Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Algunas de estas condiciones ambientales son: temperatura (mesofílica o termofílica), tipo de materias primas o sustrato y pH (generalmente cercano a la neutralidad). Estas condiciones se discuten a continuación:

2.4.1. La Temperatura

Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Muchos investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso. Debido a esto, la biotecnología anaerobia requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales (Varnero, 2011).

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaerobia (Mata-Álvarez, 2003).

Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos (Cuadro 2.3): psicrófilos, mesófilos y termófilos, siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (Lagrange, 1979).

Cuadro 2.3. Rangos de temperatura en los que trabajan los microorganismos (Lagrange, 1979).

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psychophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Hasta el momento, el rango psicofílico ha sido poco estudiado y, en general, se plantea como poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario. Sin embargo, presenta una mejor estabilidad que en los otros rangos de temperatura de operación (Hilbert, 2010).

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para conseguir una mayor velocidad del proceso, lo que implica, a la vez, un aumento en la eliminación de organismos patógenos. Sin embargo, el régimen termofílico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. Como regla general, la actividad biológica se duplica cada incremento en 10°C dentro del rango de temperatura óptima (Varnero, 1991).

2.4.2. Tipo de Materia Prima o Sustrato

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico u otros (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Residuos orgánicos de diferentes orígenes (Varnero y Arellano, 1990).

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Varnero y Arellano (1990) menciona que las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico (Hilbert, 2010).

Silva (2002), indica que la fermentación anaerobia requiere concentraciones de materia orgánica que es proporcionada por el sustrato, los

STV contienen componentes orgánicos de fácil degradación, los que teóricamente deben ser convertidos a metano.

La eficiencia de la producción de biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de los sólidos totales volátiles (Silva, 2002).

2.4.3. El pH

El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaerobia. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaerobia presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. Así por ejemplo según el IMTA (1993), el rango óptimo es entre 5.5 y 6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal.

Speece (1996), determinó que el proceso se desarrolla satisfactoriamente sí el pH no baja de 6.0 ni pasa de 8.0. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los

acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH.

En los procesos anaeróbicos, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o por la excesiva acumulación de dióxido de carbono. Una de las primeras opciones para resolver el problema es reducir la tasa de carga orgánica volumétrica, hasta el punto en el cual los AGV se consuman más rápido de lo que se generan. Una vez que el exceso de AGV se ha agotado, el pH del sistema retorna a los rangos de operación normales y la metanogénesis comienza a repuntar. La carga orgánica volumétrica puede incrementarse gradualmente a medida que el proceso se recupera, hasta completar la capacidad de carga (McCarty, 1964).

El pH de un sistema anaeróbico, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema.

2.5. El Efluente como Producto de la Digestión Anaerobia

El uso de biodigestores para el tratamiento de los residuos tiene como resultado un efluente que dependiendo de su composición permite obtener (Varnero y Arellano, 1990):

- Residuos orgánicos estabilizados que pueden usarse como mejorador de suelos y/o fertilizante orgánico.

- Un efluente con nutrientes para uso de regadío agrícola (agua residual) o para favorecer el crecimiento de biomasa algal y subproductos.
- Una mezcla gaseosa combustible, biogás, para uso doméstico o agrícola.
- Condiciones sanitarias y ecológicas de mejor calidad.

2.5.1. Agua Residual para Reúso Agrícola

Cuando las aguas residuales provenientes del biodigestor, tengan como destino el aprovechamiento para riego o fertilización, deberán cumplir con los Límites Máximos Permisibles (LMP's) de contaminantes, establecidos en las normas ambientales mexicanas vigentes en esta materia.

Para el caso de que las descargas de aguas residuales sean destinadas a ríos, embalses naturales y artificiales, aguas costeras, humedales naturales y su uso en riego agrícola, los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes Básicos, Metales Pesados, contenidos de patógenos y parásitos, serán los que se indican en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Cuadro 2.5) y NOM-003-ECOL-1997 (Cuadro 2.6) publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF).

Cuadro 2.5. NOM-003-SEMARNAT-1996: Límites Máximos Permisibles para contaminantes básicos (DOF, 1997).

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO5 mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	1	15	20	20
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	5	15	30	30

Cuadro 2.6. NOM-001-ECOL-1996: Límites Máximos Permisibles para contaminantes básicos (DOF, 1996).

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																					
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)		
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)				
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	
Sólidos Sedimentables (m/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo (2) Muestra Simple Promedio Pondera (3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006. P.D.= Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual; N.A. = No es aplicable. (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del Sitio de Muestreo

El sitio (Figura 3.1) donde se tomaron muestras frescas de excreta, se encuentra en el establo lechero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista, Saltillo, Coahuila. El área se encuentra localizada a una latitud Norte de $25^{\circ}20'49.29''$ y una longitud Oeste de $101^{\circ}01'56.88''$ con 1,796 msnm.



Figura 3.1. Localización del sitio de muestreo.

3.2. Procedimiento de Muestreo

Se describe el proceso de muestreo que se realizó en el establo lechero en la UAAAN.

3.2.1. Muestreo Manual

La toma de las muestras se realizó en las siguientes fechas:

- 08 de noviembre de 2011
- 20 de abril de 2012
- 21 de mayo de 2012

El muestreo realizado fue por el método manual. Esto implica la necesidad del muestreador de desplazarse para generar las muestras simples. El procedimiento general utilizado para el muestreo fue el siguiente:

1. Ir al sitio de muestreo.
2. Ubicar la muestra fresca (excreta).
3. Con precaución, ingresar al corral.
4. Usar guantes de latex, bolsas de plástico de 5 kilogramos y cubre bocas para recoger la muestra.
5. Colectar aproximadamente dos kilogramos de excreta fresca y cerrar la bolsa.
6. Trasladar la muestra al lugar donde se va trabajar con ella (laboratorio).

3.3. Métodos empleados para el Muestreo y Preparación de las Muestras

La investigación se llevo a cabo en el laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

3.3.1. Materiales y Métodos

Al trasladar las muestras al laboratorio, se inicia el siguiente procedimiento para su análisis:

1. Pesar un kilogramo de excreta y diluirlo en cinco litros de agua hasta tener una mezcla homogénea.
2. La mezcla se vierte en el reactor del biodigestor anaerobio ARMFIRLELD W8.
3. Llenar el colector con calibración volumétrica con agua, revisar que no se genere ninguna burbuja de aire.
4. Revisar que el equipo funcione correctamente.
5. Ajustar en el biodigestor la temperatura a la que se va trabajar (37 °C, 45 °C y 50 °C).
6. De la misma mezcla que se colocó en el reactor, se toma un litro y se refrigera (influyente).
7. Apuntar la lectura diaria del colector con calibración volumétrica para ir observando la producción de biogás por un periodo aproximado de 30 días.

8. Después de que se cumpla el tiempo estimado, se toma una muestra de salida (efluente) y refrigerar.
9. Apagar y limpiar el biodigestor para trabajar con las siguientes muestras a diferentes temperaturas.
10. Analizar el influente y efluente de cada digestión para tener los parámetros de observación.

3.3.2. Parámetros de Observación

Los parámetros de calidad de agua se obtienen con el fin de evaluar su calidad a través de valores numéricos y establecer los criterios en los que pudiera existir algún problema. En el cuadro 3.1 se muestran los análisis a los que fueron sometidos el influente y efluente de cada digestión.

Cuadro 3.1. Parámetros y métodos físico-químico-biológicos del influente y efluente.

PARÁMETROS	MÉTODO
pH	Electrométrico
Conductividad Eléctrica (CE)	Electrométrico
Sólidos Totales (ST)	Gravimétrico
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Gravimétrico
Sólidos Totales Volátiles (STV)	Gravimétrico
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	DBO ₅
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Reflujo
Nitrógeno Total (NTK)	Kjeldahl
Coliformes Totales (CT)	NMP
Coliformes Fecales (CF)	NMP
Calcio (Ca ⁺²)	Titulación
Magnesio (Mg ⁺²)	Titulación
Carbonatos (CO ₃ ⁻²)	Titulación
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻¹)	Titulación
Cloruros (Cl ⁻¹)	Titulación
Sodio (Na ⁺¹)	Gravimétrico
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	Gravimétrico

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de las digestiones a diferentes temperaturas se muestran en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Parámetros físico-químico-biológicos del influente y efluente de las excretas líquidas de ganado bovino a diferentes temperaturas.

TEMPERATURA	37°C		45°C		50°C	
PARÁMETROS	INFLUENTE	EFLUENTE	INFLUENTE	EFLUENTE	INFLUENTE	EFLUENTE
pH	6.5	5.08	6.8	5.61	6.49	5.37
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	3450	1352	3239	1756	3120	1859
ST (mg.l^{-1})	4190	8930	61480	5600	15200	5660
SST (mg.l^{-1})	2040	820	100960	660	19200	1100
STV (mg.l^{-1})	1820	460	89820	580	2400	420
DBO ₅ (mg.l^{-1})	290	110	599.14	402	640	382.7
DQO (mg.l^{-1})	210	160	330	250	320	240
CT (NMP)	2400	110	2400	350	2400	90
CF (NMP)	1070	45	960	90	1250	65
Ca ⁺² (meq)	-	2.88	-	25.5	-	8.5
Mg ⁺² (meq)	-	1.56	-	19.2	-	22.5
CO ₃ ⁻² (meq)	-	2.4	-	6.5	-	3.76
HCO ₃ ⁻¹ (meq)	-	18.7	-	14	-	14.5
Cl ⁻¹ (meq)	-	1.2	-	6.5	-	2.9
Na ⁺¹ (meq)	-	11.78	-	2.2	-	3.76
SO ₄ ⁻² (meq)	-	5.97	-	7.9	-	11.34
NTK (ppm)	-	27	-	33	-	30

La observación de las lecturas diarias de cada digestión a sus respectivas temperaturas tuvo diferente comportamiento, se puede observar en la figura 4.1 los incrementos y decrementos de la producción de biogás.

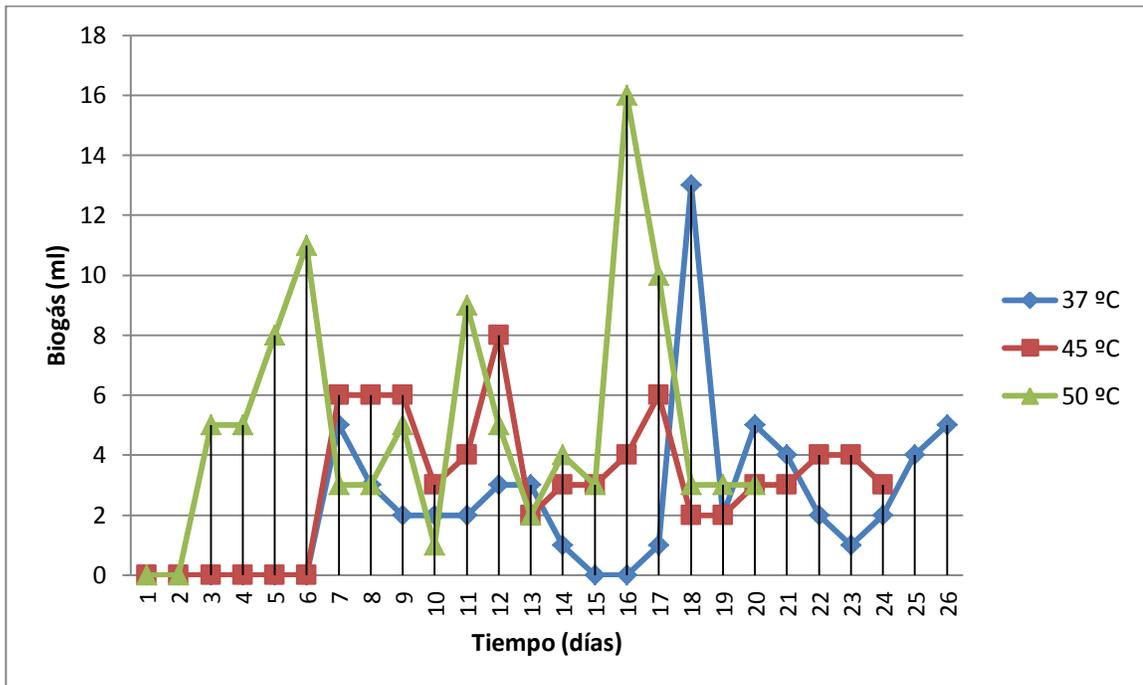


Figura 4.1. Producción de Biogás diario a 37 °C, 45 °C y 50 °C.

A su vez en la figura 4.1 se puede apreciar que las temperaturas 37 °C y 45 °C en un inicio tuvieron una lenta velocidad reacción a comparación de la temperatura de 50 °C. También se observa que las digestiones tuvieron diferentes tiempos de retención en el reactor y que todas las digestiones tuvieron variaciones en la producción de biogás.

A simple vista se podría decir que la temperatura de 50 °C tiene una producción mayor que las demás, pero para determinar la temperatura que produce mayor cantidad de biogás, se realizó una comparación de medias con

$\alpha = 0.05$. Apoyándonos con Excel se realiza un ajuste de curvas polinomial (Figuras 4.2, 4.3 y 4.4) para obtener la proporción de variación de la producción de biogás a diferentes temperaturas.

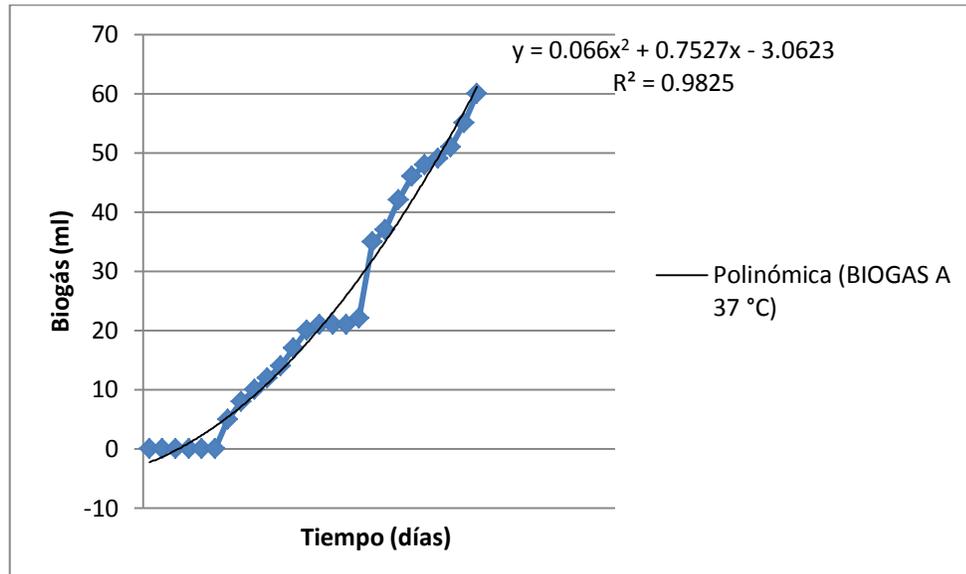


Figura 4.2. Ajuste polinomial de la producción diaria de biogás a 37 °C.

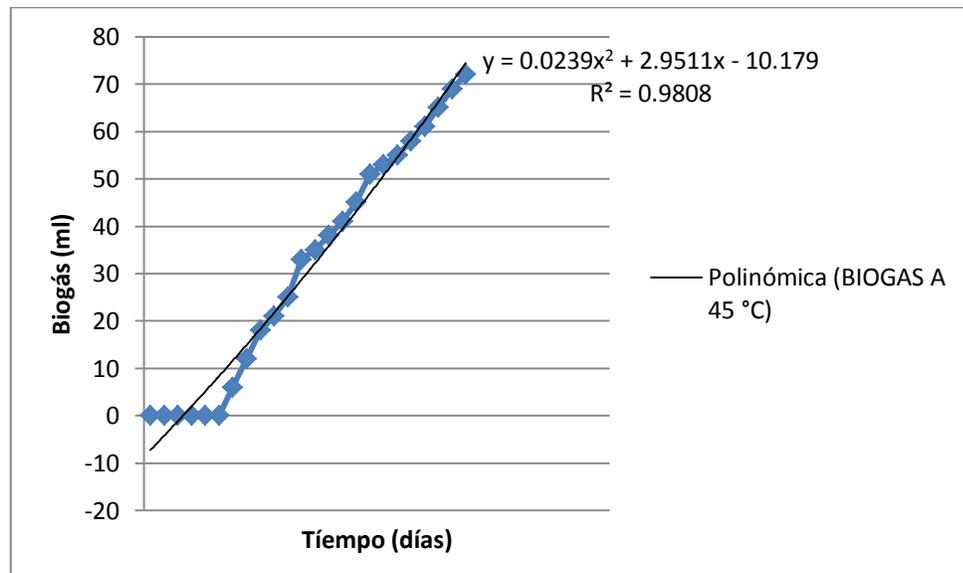


Figura 4.3. Ajuste polinomial de la producción diaria de biogás a 45 °C.

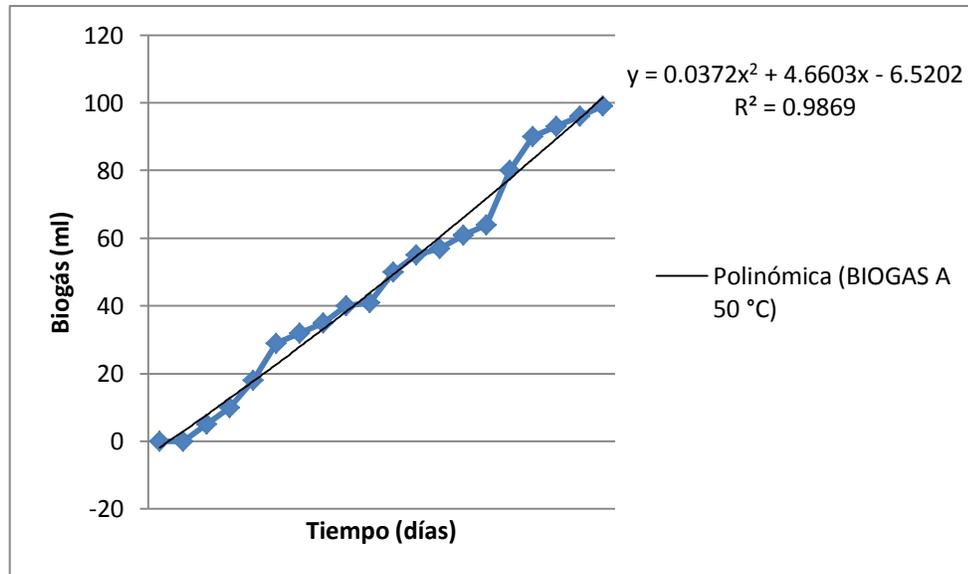


Figura 4.4. Ajuste polinomial de la producción diaria de biogás a 50 °C.

Para la comparación de medias se empleará la distribución “t” student con los datos del cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Valores de la media, varianza y número de observaciones de las digestiones a 37°C, 45°C y 50°C.

TEMPERATURA 37 °C	TEMPERATURA 45 °C	TEMPERATURA 50 °C
x = 2.31	x = 3.00	x = 4.95
n = 26	n = 24	n = 20
S = 0.9776	S = 0.981	S = 0.992

Primera comparación – Temperatura 37°C (μ_1) Vs. Temperatura 45°C (μ_2)

$$P[-1.253 < \mu_1 - \mu_2 < -0.127] = 95\%$$

Tenemos que $\mu_1 < \mu_2$ por lo tanto, la muestra a 45°C produce mayor cantidad de biogás que la temperatura a 37°C.

Segunda comparación – Temperatura 45°C (μ_1) Vs. Temperatura 50°C (μ_2)

$$P[-2.557 < \mu_1 - \mu_2 < -1.343] = 95\%$$

Tenemos que $\mu_1 < \mu_2$ por lo tanto, la muestra a 50°C produce mayor cantidad de biogás que la temperatura a 45°C.

Tercera comparación – Temperatura 50°C (μ_1) Vs. Temperatura 37°C (μ_2)

$$P[-2.045 < \mu_1 - \mu_2 < 3.235] = 95\%$$

Tenemos que $\mu_1 > \mu_2$ por lo tanto, la muestra a 50°C produce mayor cantidad de biogás que la temperatura a 37°C.

En la comparación de medias da como resultado que la digestión a 50°C produce más biogás que el resto de las demás digestiones, para visualizar el análisis anterior consulte la figura 4.5.

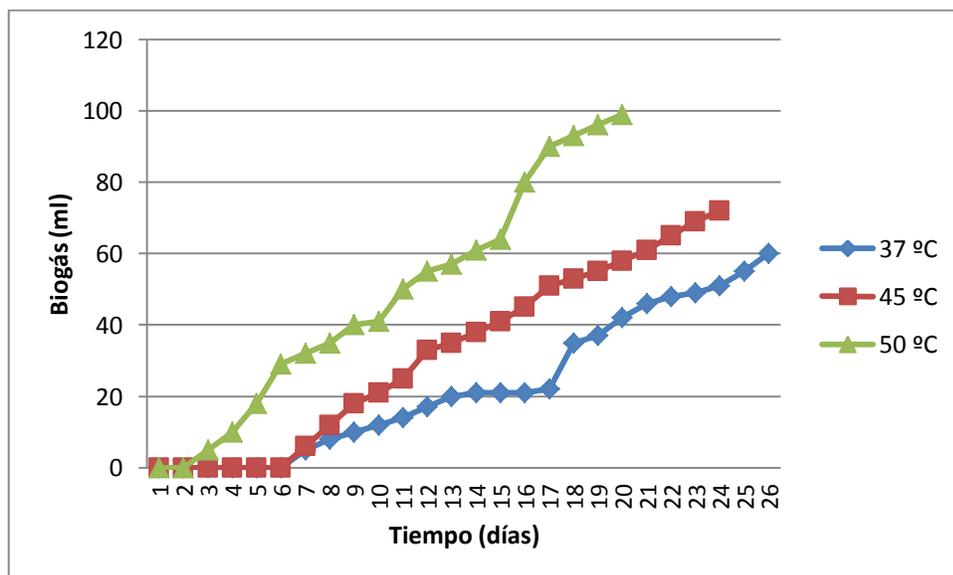


Figura 4.5. Producción de biogás acumulado de las digestiones con sus respectivas temperaturas.

Hay una correlación entre la presencia de los sólidos totales volátiles y la producción de biogás, es decir, entre mayor cantidad de sólidos volátiles mayor producción de biogás. En las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se muestra el comportamiento entre estas variables a cada temperatura y se estimó su respectiva correlación que se muestran en los cuadros 4.2, 4.3 y 4.4.

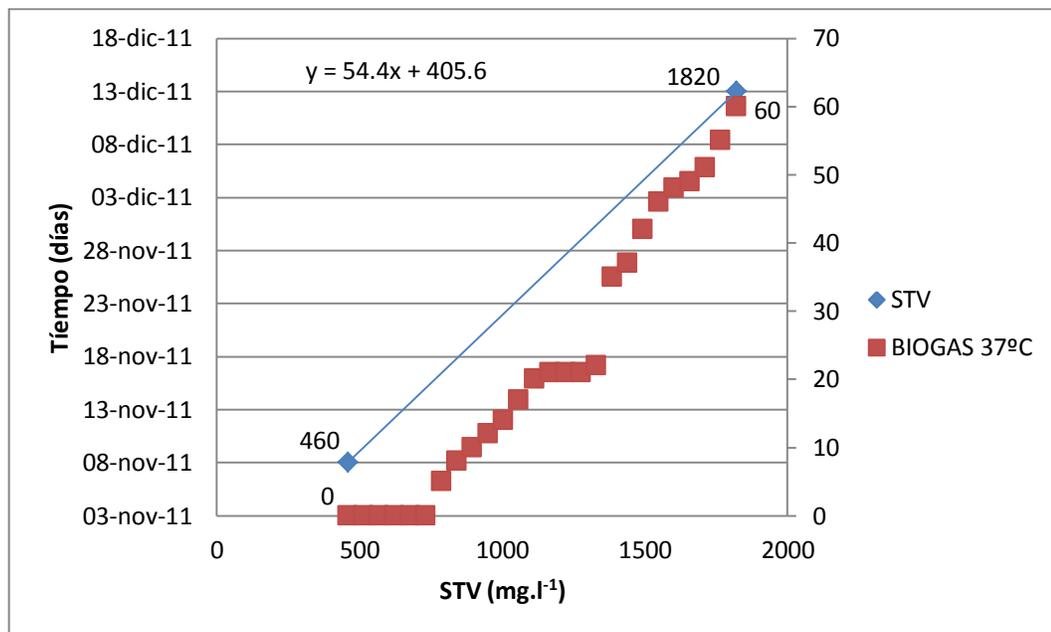


Figura 4.6. Relación de los sólidos totales volátiles y la producción de biogás total a 37°C.

Con el cuadro 4.2 se determina que sí existe una correlación positiva entre la producción de biogás a 37°C y los sólidos totales volátiles en un 97.65 por ciento.

Cuadro 4.2. Coeficiente de correlación entre los STV y el biogás en la digestión a 37 °C.

37°C	STV	BIOGAS
STV	1	
BIOGAS	0.9765	1

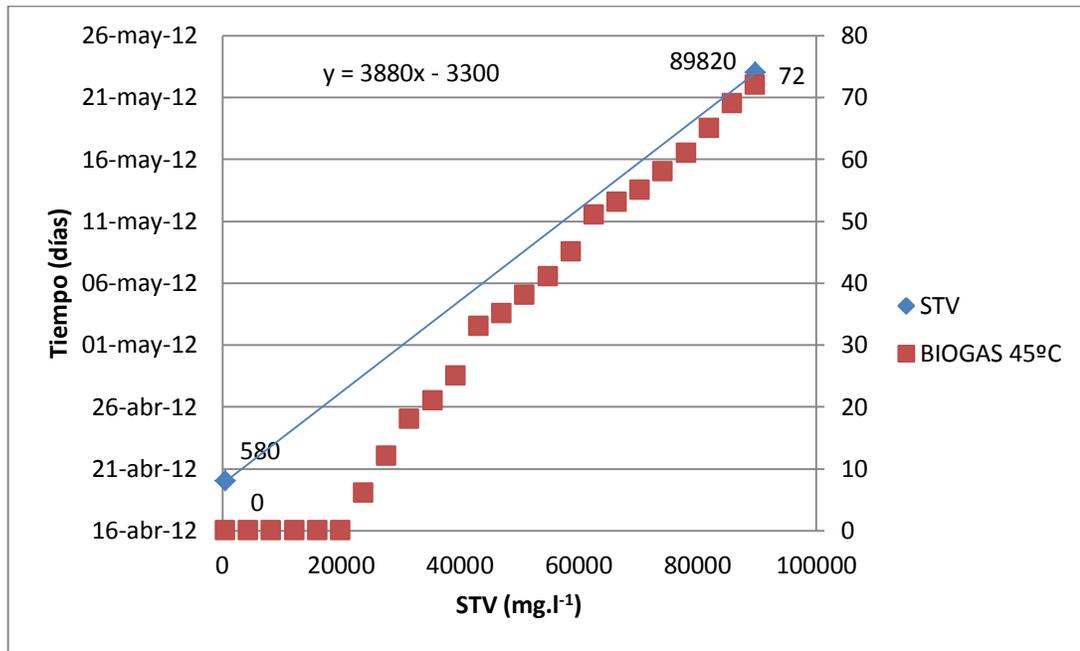


Figura 4.7. Relación de los sólidos totales volátiles y la producción de biogás total a 45°C.

Con el cuadro 4.3 se determina que sí existe una correlación positiva entre la producción de biogás a 45°C y los sólidos totales volátiles en un 98.95 por ciento.

Cuadro 4.3. Coeficiente de correlación entre los STV y el biogás en la digestión a 45 °C.

45°C	STV	BIOGAS
STV	1	
BIOGAS	0.9895	1

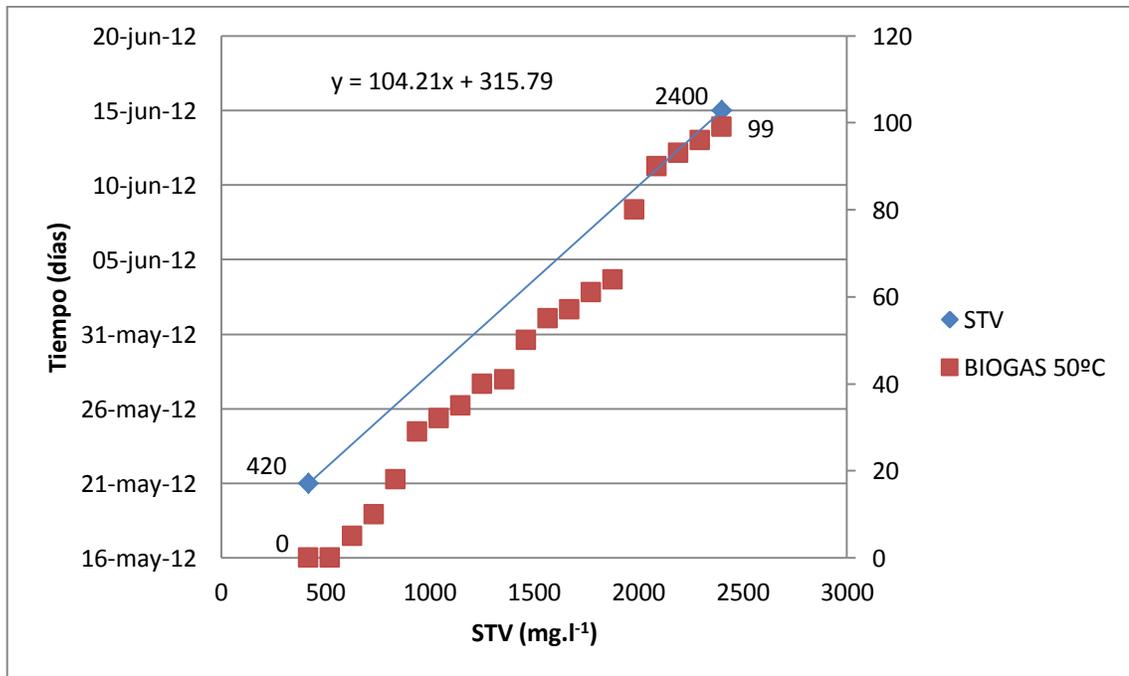


Figura 4.8. Relación de los sólidos totales volátiles y la producción de biogás total a 50°C.

Con el cuadro 4.4 se determina que sí existe una correlación positiva entre la producción de biogás a 50°C y los sólidos totales volátiles en un 99.28 por ciento.

Cuadro 4.4. Coeficiente de relación entre los STV y el biogás en la digestión a 50 °C.

<i>50°C</i>	<i>STV</i>	<i>BIOGAS</i>
STV	1	
BIOGAS	0.9928	1

Como se ha mencionado, mientras mayor cantidad de STV mayor cantidad de biogás. En la digestión a 45 °C (Figura 4.7) tiene la mayor cantidad de STV en comparación de las digestiones a 37 °C y 50 °C pero tuvo una menor generación de biogás, siendo la temperatura a 50 °C la producción mayor. El mejor coeficiente de correlación es la digestión a 50 °C (Cuadro 4.4) con un 99.28 por ciento indicando que es la más eficiente en la producción de biogás, esto se debe a que la velocidad de reacción es superior que las demás.

Para que la digestión a 50°C genere más biogás se debe prolongar la retención celular.

Análisis Físico-Químico del Efluente

Se compararon los parámetros determinados de los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996 y los límites máximos permisibles con servicios al público con contacto directo o servicio al público con contacto indirecto u ocasional a la NOM-003-SEMARNAT-1996; así como

la composición típica del agua residual doméstica de acuerdo a Castellanos y Uvalle (2000).

En el cuadro 4.5 sólo compara los parámetros físico-químico para uso agrícola (NOM-001-ECOL-1996) ya que estos parámetros son los necesarios para riego y la norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus reúsos.

Cuadro 4.5 Parámetros físico-químicos comparados con los de la NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996).

TEMPERATURA	37°C	45°C	50°C	NOM-001-ECOL-1996	
PARÁMETROS	EFLUENTE	EFLUENTE	EFLUENTE	Ríos Uso Riego	Embalses Nat. y Art. Uso de riego
pH	5.08	5.61	5.37	5 a 10	5 a 10
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	1352	1756	1859	-	-
ST (mg.l^{-1})	8930	5600	5660	-	-
SST (mg.l^{-1})	820	660	1100	200	125
STV(mg.l^{-1})	460	580	420	-	-
DBO ₅ (mg.l^{-1})	110	402	382.7	200	150
DQO (mg.l^{-1})	160	250	240	-	-
CT (NMP)	110	350	90	-	-
CF (NMP)	45	90	65	-	-
NTK (mg.l^{-1})	27	33	30	60	60

Los límites máximos permisibles para los parámetros DBO₅ y SST, que debe de cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son establecidos en el cuadro 2.5 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 referida en el punto 2 de esta misma, o a las

condiciones particulares de la descarga de ríos en uso de riego agrícola así como las descargas en embalses naturales y artificiales para uso de riego.

Los parámetros que no cumplen de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996 son:

- Sólidos Suspendidos Totales en ninguna condición particular de la norma.
- DBO₅ a 45 y 50°C en ninguna de las condiciones particulares.

En el cuadro 4.6 se observan los parámetros que considera la NOM-003-ECOL-1996 para el uso de riego en parques y jardines; así como en la agricultura.

Cuadro 4.6. Parámetros físico-químico-biológicos comparados con los de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997).

TEMPERATURA	37°C	45°C	50°C	NOM-003-SEMARNAT-1996	
PARÁMETROS	EFLUENTE	EFLUENTE	EFLUENTE	Contacto directo	Contanco indirecto
pH	5.08	5.61	5.37	-	-
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	1352	1756	1859	-	-
ST (mg.l^{-1})	8930	5600	5660	-	-
SST (mg.l^{-1})	820	660	1100	20	30
STV(mg.l^{-1})	460	580	420	-	-
DBO ₅ (mg.l^{-1})	110	402	382.7	20	30
DQO (mg.l^{-1})	160	250	240	-	-
CT (NMP)	110	350	90	-	-
CF (NMP)	45	90	65	240	1000
NTK (mg.l^{-1})	27	33	30	-	-

El único parámetro que cumplió los límites de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1996 fue el de los coliformes fecales en todas las digestiones.

La demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos suspendidos totales sobrepasan los rangos que establece esta norma.

Al efluente de cada digestión a diferentes temperaturas también se le realizó un análisis agronómico para uso agrícola como lo recomienda Catellanos y Uvalle 2000 (Cuadro 4.7).

Interpretaciones y recomendaciones del cuadro 4.7:

La conductividad eléctrica (CE) es condicionada, es decir, alta en sales. Limitando el reúso del efluente a cultivos tolerantes a la salinidad.

La salinidad efectiva (SE) y la salinidad potencial (SP) tienen restricciones “no recomendable” y “condicionada” respectivamente, también el carbonato de sodio residual (CSR) en su mayoría es no recomendable. Esto ocurre porque estos parámetros tienen una relación directa con los aniones y cationes, es decir, si tengo valores altos de aniones y cationes tendré valores elevados de SE, SP y CSR. El porcentaje de sodio posible (PSP) es baja, sin restricciones.

La clasificación del efluente es C_3S_1 , agua alta en sales y baja en sodio. El agua de riego presentada tiene una conducción elevada que debe usarse con precaución, aplicar en cultivos tolerantes a la salinidad y en suelos con buen drenaje. No regar por aspersión.

Al comparar los resultados con los rangos proporcionados por Castellanos y Uvalle (2000), los efluentes son condicionados y además éstos contienen materia orgánica que benefician a los cultivos, por lo tanto los efluentes pueden

ser reutilizados para riego agrícola teniendo en cuenta las condiciones del agua C_3S_1 que se mencionaron anteriormente.

Cuadro 4.7. Parámetros Agronómicos del Efluente de las Digestiones a 37°C, 45°C y 50°C (Castellanos y Uvalle, 2000).

PARÁMETROS	CALIDAD DE AGUA DE RIEGO MANUAL DE INTERPRETACIÓN DE SUELOS Y AGUAS			DIGESTIONES Y CLASIFICACIONES					
	RESTRICCIÓN	Leve a Ninguno moderado	Severo no recomendable	37°C	CLASIFICACIÓN	45°C	CLASIFICACIÓN	50°C	CLASIFICACIÓN
pH	-	6.0 a 8.5	-	5.08	Buena	5.61	Buena	5.37	Buena
CE (dS.cm ⁻¹)	< 0.7	0.7 a 3.0	> 3.0	1.35	C3 Alta en sales	1.76	C3 Alta en sales	1.86	C3 Alta en sales
SDT (mg.l ⁻¹)	< 450	450 a 2000	> 2000	-	-	-	-	-	-
Ca ⁺² (meq)	-	-	-	2.88	-	25.5	-	8.5	-
Mg ⁺² (meq)	< 0.1	0.1 a 1.5	> 1.5	1.56	No recomendable	19.2	No recomendable	22.5	No recomendable
CO ₃ ⁻² (meq)	-	-	-	2.4	-	6.5	-	3.76	-
HCO ₃ ⁻¹ (meq)	< 1.5	1.5 a 8.5	> 8.5	18.7	No recomendable	14	No recomendable	14.5	No recomendable
Cl ⁻¹ (meq)	< 4.0	4.0 a 10	> 10	1.2	Buena	6.5	Condicionada	2.9	Buena
Na ⁺¹ (meq)	< 3.0	3.0 a 9.0	> 9.0	11.78	No recomendable	2.2	Buena	3.76	Condicionada
SO ₄ ⁻² (meq)	< 0.5	0.5 a 2.0	> 2.0	5.97	No recomendable	7.9	No recomendable	11.34	No recomendable
SE (meq.l ⁻¹)	< 3.0	3.0 a 15.0	> 15	23.83	No recomendable	21.4	No recomendable	16.5	No recomendable
SP (meq.l ⁻¹)	< 3.0	3.0 a 15.0	> 15	4.185	Condicionada	10.45	Condicionada	8.57	Condicionada
RAS	-	0 a 3.0	-	5.59	-	0.329	S1 Condicionada	0.675	S1 Condicionada
CRS (meq.l ⁻¹)	< 1.25	1.25 a 2.5	> 2.5	16.6	No recomendable	-24.2	Buena	12.74	No recomendable
PSP (%)	< 50%	> 50%	-	49.43	Buena	10.28	Buena	22.79	Buena
Boro	< 0.5	0.5 a 4.0	> 4.0	-	-	-	-	-	-

V. CONCLUSIONES

- La producción de biogás depende directamente de la temperatura, se aprecia que la temperatura a 50 °C fue la primera en producir biogás en un período menor de digestión, contrario a las demás temperaturas que permanecieron más días en el reactor con una producción menor de biogás; cumpliéndose lo que menciona Lagrange, 1979. Consecuentemente la temperatura a 45 °C produce más biogás que la digestión a 37 °C.
- Existe una correlación positiva entre los sólidos totales volátiles y la producción de biogás.
- Desde el punto de vista biológico los SST y la DBO₅ podrían cumplir con las normas NOM-001-ECOL-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 si se alarga el periodo de digestión. En el campo, el hecho que aporte materia orgánica al suelo a pesar de no cumplir con las normas mencionadas, no lo afecta sino lo enriquece.
- En el caso de que los CT y CF no cumplieran con las normas, también es necesario prologar el tiempo de digestión para eliminar el mayor numero posible y que agua pueda ser reutilizada en los cultivos permitidos (fibra, grano, etc).

- A pesar de que la DBO_5 , CT, CF y SST no cumplen con los rangos de las normas oficiales mexicanas, se aprecia el decremento de los parámetros por la degradación de las bacterias.
- El efluente cumple con los parámetros agronómicos de Castellanos y Uvalle (2000), por lo tanto es factible reusarlo para riego agrícola. La calidad del efluente es alta en sales y baja en sodio, debe de aplicarse en cultivos tolerantes a la salinidad y tener precaución en su manejo.
- La digestión anaerobia es una excelente opción para reducir el grado de contaminación del agua residual y poder reusar el efluente para riego agrícola y a su vez ahorrar el agua consumida por la explotación lechera.

VI. LITERATURA CITADA

- Boadi D, Benchaar C, Chiquette J and Massé D. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: Update review. *Can J Anim Sci* 2004.
- Brock, T.D., Madigan, M.T., Martinko, J.M., Parker, J. 1994. *Biology of Microorganisms*. Prentice-Hall, New York, USA.
- Campos A.E. 2001. Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis Doctoral. Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Dpto. de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lérida. España.
- Cárdenas, M.J. 2010. México ante el Cambio Climático: evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación. Greenpeace México.
- Carmona, J.C., Bolívar, D.M. y Giraldo, L.A. 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Rev. Col Cienc Pec*.
- Castellanos, J.Z. y J.X. Uvalle. 2000. *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*.
- Cendales, E.D. 2011. Producción de biogás mediante la cogestión anaerobia de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para ser utilizado como fuente de energía renovable. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 1992. Artículo 1. Definiciones.
- Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC). 2005. *Cuidar el clima Guía de la Convención Marco sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kioto*.
- Deublein D., Steinhauser A. 2008. *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1996. Publicación de la NOM-001-ECOL-1996.

- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1997. Publicación de la NOM-003-SEMARNAT-1997.
- Gamrasni, M.A. 1985. Aprovechamiento Agrícola de Aguas Negras Urbanas. Asociación Francesa para el estudio de las aguas. Ed. Limusa. México.
- Hansson A., Chritenson K. 2005. Biogás ger energy till ekologist landtbruk. Report Swendish Board of Agriculture.
- Hilbert, J.A. 2010. Manual para la producción de biogás. Instituto Nacional de Tecnología (INTA), Castelar. Argentina.
- IEA Bioenergy. 2002. Biogás and More: Systems and Market Overview of Anaerobic Digestion. AEA Techonology Environment.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2006. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990 – 1996. Evolución de emisiones de GEI en México.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1993. Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales. Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. Anuario de estadísticas por entidad federativa 2011.
- Johnson KA, Johnson DE. Methane emissions from cattle. J Anim Sci 1995.
- Klübler H., Hoppenheidt K., Hirsch P., Nimmrichter R., Kottmair A., Nordsieck H., Swerev M., Mucke W., 1999. Full scale codigestioón of organic waste.
- Lagrange, B. 1979. Biomethane. Principes, Techniques, Utilisation. Vol.2. Edisual / Energies Alternatives.
- Levine, J.S. 1994. Biomass burning and the production of greenhosue gases. In: Zepp, R.G. (ed) 1994. Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change. John Wiley and Sons. ISBN 0-471-58943-3.
- Madigan, M.T, Martinko, J.M. & Parker,J. 2003. *Brock Biología de los Microorganismos*, 10ª edición. Ed. Prentice-Hall, Madrid.
- Mah RA. 1982. Methanogenesis and methanogenic partnerships. Phil Trans R Soc Lond.
- Mata-Álvarez J. 2003. Biomethanization of the organic fraction of municipal soil wastes. IWA Publishing, 1 900222 14 0.
- Mata-Álvarez J., S. Macé P., Llabrés. 2000. Anaerobic digestión of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource Technology.

- McCarty, P. L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals. Part III: Toxic materials and their control.
- Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente (MDSMA). 1997. Inventario de Gases de Efecto Invernadero en la Agricultura y Animales Domésticos. Argentina.
- Metcalf & Eddy, Inc. 1997. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Ed. McGraw Hill. México, D.F.
- Moss, A.R. and Givens, D.I. 2002. The effect of supplementing grass silage with soya vean meal on digestibility, in sacco degradability rumen fermentation and methane production in sheep. *Animal Feed Science and Technology*.
- Moss, A.R., Jouany, J.P. and Newbold, J. 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *INRAEDP Sciences. AnnZootech*.
- NOM-001-ECOL-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios públicos.
- Ostrem K. 2004. Greening waste anaerobic digestión for treating the organic fraction of municipal soil waste. M.S. thesis in Earth Resources Engineering. Columbia University.
- Ramírez, H. I. F. 2010. Emisiones de metano generadas por excretas de animales de granja y contenido ruminal de bovino. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Texcoco, Edo. de México.
- Ramírez-Restrepo CA, Barry TN, McWilliam EL, LópezVillalobos N, Clark H. 2007. Methane production from sheep grazing either willow fodder blocks or dryland pasture. *GGAAC. New Zeland*.
- Reynoso A.R. 2011. Fisiología Veterinaria. Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Romero Rojas, Jairo A. 1994. Lagunas de estabilización de aguas residuales. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sánchez J. R. 2005. Introducción a la producción de biogás. Centro Cristiano de reflexión y dialogo. Cárdenas Matanzas. Cuba.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2010. Emisiones de GEI por sector en México. Cambio Climático.

Fundamentos. Participación de la Dirección General de Políticas para el Cambio Climático.

- Sharma RK. 2005. Nutritional strategies for reducing methane production by ruminants. *Indian J Res.*
- Silva J.P. 2002. Tecnología del Biogás. Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Colombia.
- Speece, R. E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments. Archae Press, Nashville, TN, USA.
- Tebbutt, T.H.Y. 1990. Fundamentos de Control de la Calidad del Agua. Primera Edición. Ed. Limusa. México, D.F.
- Torres, G.G. y V.R. Zárate. 1996. Estudio técnico sobre la factibilidad de tratamiento, manejo y disposición de los lodos residuales de la planta de tratamiento. Agua Industrial de Monterrey, S. de U., Monterrey, N.L., Abril. 182 pp.
- Uso de Suelo y Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSS). 2006. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 – 2006.
- Varnero, M.T. 1991. Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás. Ministerio de Agricultura (FIA) – Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile.
- Varnero, M.T. 2011. Manual de Biogás. Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Global Environment Facility (GEF). Santiago, Chile.
- Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile.