

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“Estudio integral de un reactor anaerobio de geomembrana para la producción de biogás a partir de excretas de ganado bovino”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

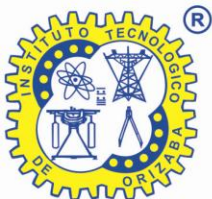
I.Q. José Ulises Roa Rosas

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

CODIRECTOR DE TESIS:

M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú



Orizaba, Veracruz, México.

Febrero 2016



"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA: 03/02/2016
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I


C. JOSÉ ULISES ROA ROSAS
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"ESTUDIO INTEGRAL DE UN REACTOR ANAEROBIO DE GEOMEMBRANA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCRETAS DE GANADO BOVINO" .

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA

ggc



"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA : 01/02/2016

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

JOSÉ ULISES ROA ROSAS

la cual lleva el título de:

"ESTUDIO INTEGRAL DE UN REACTOR ANAEROBIO DE GEOMEMBRANA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCRETAS DE GANADO BOVINO" .

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN


FIRMA

SECRETARIO : M.I. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU


FIRMA

VOCAL : M.I. ADRIAN REYES BENITEZ


FIRMA

VOCAL SUP. : DRA. YOLANDA SONIA PLIEGO BRAVO


FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I Tesis



DEDICATORIAS

Dios:

Gracias Dios por haberme dado la vida, la salud y por no dejarme rendir esos días y noches cuando trabajaba en el laboratorio o en mi casa en el desarrollo de esta investigación, por darme la fuerza, coraje y la sabiduría necesaria para afrontar los retos presentados en el día a día para poder lograr mis sueños y objetivos.

Mis padres:

Gracias a mis padres por haberme apoyado en todo momento y permitirme perseguir mis sueños y objetivos, por su comprensión y paciencia, por todos los sacrificios que realizaron a lo largo de todos mis estudios para que yo pueda cumplir mis sueños y aunque nunca podré pagar todo lo que me han dado en verdad les doy las gracias y este logro obtenido es para ustedes.

Hermano:

Por ser un gran ejemplo para mí de lucha, superación y esfuerzo por enseñarme que los sueños se pueden alcanzar por ser una gran persona y por todo su apoyo brindado.

Amigos:

Gracias a mis amigos José Luis y Emilio, por toda su paciencia, comprensión y apoyo brindado, por todas esas experiencias que pasamos a lo largo de estos dos años de maestría, por esos días bueno y otros no tan buenos pero al final del día o de cada semestre superamos todos los obstáculos, por esos días de risas u otros de arduo trabajo para terminar el trabajo tanto en clases como en el laboratorio.

Compañeros de clase y laboratorio:

Gracias a mis compañeros de clase porque en ciertas materias trabajamos en equipo y logramos sacar en trabajo adelante, a mis amigos y compañeros de laboratorio Paty, Erick, Alma, Shamir, Crystal y Amy por soportarme en el laboratorio mis bromas, chistes y carácter.

RECONOCIMIENTOS

Dr. Alejandro Alvarado Lassman, agradezco por confiar en mí y haberme aceptado como su tesista, por su apoyo incondicional y colaboración en el desarrollo de este proyecto como director de tesis, por su gran disponibilidad, paciencia y por facilitarme las herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación. Le agradezco por las enseñanzas y consejos brindados, fue un honor haber trabajado con usted.

M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú, agradezco por el apoyo brindado durante el desarrollo de la investigación, por las revisiones y comentarios que realizo para mejorar la tesis, por la disposición y paciencia.

M.I.A. Adrián Reyes Benítez, agradezco por todas sus enseñanzas recibidas desde el inicio de la maestría como profesor, hasta la revisión del presente trabajo, por su disposición, paciencia y por compartir sus conocimientos.

Dra. Yolanda Sonia Pliego Bravo, agradezco por su disposición y el apoyo brindado durante las revisiones y comentarios que me brindo para enriquecer la tesis, por sus enseñanzas y compartir sus conocimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado mediante la beca 583198 en el periodo comprendido de Enero 2014 a Enero de 2016.

RECONOCIMIENTOS

- Poster **Aprovechamiento de las excretas bovinas en el proceso de digestión anaerobia en la producción de bioenergéticos.**
Congreso Internacional de Ingeniería y Ciencias Químicas – CHEMSCIE. Universidad Veracruzana 4 de septiembre de 2015.
- Oral **Cinéticas de degradación anaerobia de excretas bovinas para la producción de bioenergéticos.**
Coloquio de Investigación Multidisciplinaria (CIM). Instituto Tecnológico de Orizaba, 23 de octubre 2015.

RESUMEN

Estudio integral de un reactor anaerobio de geomembrana para la producción de biogás a partir de excretas de ganado bovino

Elaborado por: I.Q José Ulises Roa Rosas

Dirigida por: Dr. Alejandro Alvarado Lassman

M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Debido al acelerado crecimiento de los seres humanos cientos de toneladas de residuos son generados anualmente, diversos estudios son de interés como una opción parcial para dar tratamiento a los residuos y así poder obtener un beneficio. El uso de procesos biológicos como la digestión anaerobia es una alternativa viable como solución a los diversos problemas ambientales a partir de residuos orgánicos.

El siguiente trabajo presenta un estudio realizado a un reactor de geomembrana el cual se encarga de tratar las excretas de ganado bovino para la producción de energía. El estudio consistió en el monitoreo el reactor de geomembrana en un período de tres meses logrando alcanzar una remoción con base a su DQO_T del 70% y de DQO_S del 60% con un pH promedio de entrada de 7.82 y de salida de 6.45. Además se llevaron a cabo cinéticas de degradación, éstas se montaron en reactores de 250 mL, el estudio consistió en realizar diferentes mezclas (excretas – inóculo) en diferentes proporciones, las diferentes combinaciones se expresan en porcentaje teniendo las siguientes relaciones: 80–20, 70–30, 60–40 y 50–50, conservando la relación excretas – inóculo. Simultáneamente se realizó también una co-digestión con Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en las siguientes proporciones: 50-40-10, 50-30-20 y 50-25-25 excretas-inóculo-RSU respectivamente con el objetivo de encontrar la mejor combinación y mayor producción de biogás. Los resultados obtenidos a través de las cinéticas de degradación demuestran que la digestión anaerobia es una alternativa viable para dar tratamiento a este tipo de residuos, para su aprovechamiento para la obtención de energía.

ABSTRACT

Comprehensive study of a geomembrane anaerobic reactor for the production of biogas from manure of cattle

By: I.Q. José Ulises Roa Rosas

Advisor(s): Dr. Alejandro Alvarado Lassman

M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Due to the rapid growth of human beings hundreds of tons of waste are generated each year, some studies are of interest as an option to treat waste so they can make a profit. The use of biological processes such as anaerobic digestion is a viable alternative as a solution to many environmental problems from organic waste.

This work presents a study of a geomembrane reactor in which cattle manure is treated to produce energy. The study consisted of monitoring the geomembrane reactor over a period of three months reaching a removal based on their COD_T 70% and 60% COD_S with an average pH input 7.82 and output 6.45. Also took out kinetics after degradation, they were mounted in 250 mL reactors, the study was to conduct various mixtures (excreta - inoculum) at different rates

The combinations are expressed as percentages having the following relationships: 80-20, 70-30, 60-40 and 50-50, retaining the manure relationship - inoculum. Simultaneously, It has been made a co-digestion with municipal solid waste (MSW) in the following proportions: 50-40-10, 50-30-20 and 50-25-25 manure-inoculum-MSW respectively in order to find the best mix and more biogas production. The results obtained through the kinetics after degradation demonstrate that anaerobic digestion is a viable option to treat this type of waste, for its use for the production of alternative energy.

ÍNDICE

| | Pág. |
|--|------|
| Lista de figuras | IV |
| Lista de tablas | VI |
| Nomenclatura | VII |
| Introducción | 1 |
| Objetivo | 3 |
| CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 4 |
| 1.1 Residuos orgánicos | 5 |
| 1.1.1 Clasificación de los residuos | 5 |
| 1.1.2 Procedencia de los residuos | 6 |
| 1.1.3 Peligrosidad | 6 |
| 1.1.4 Residuos de manejo especial | 7 |
| 1.1.4.1 Residuos de ganado bovino | 7 |
| 1.2 Digestión anaerobia | 8 |
| 1.2.1 Etapas de la digestión anaerobia | 10 |
| 1.2.2 Factores que regulan el proceso de digestión anaerobia | 13 |
| 1.2.2.1 Tipo de sustrato (nutrientes disponibles) | 14 |
| 1.2.2.2 Temperatura | 14 |
| 1.2.2.3 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) | 15 |
| 1.2.2.4 Carga volumétrica aplicada (Cva) | 16 |
| 1.2.2.5 Nivel de acidez (pH) | 16 |
| 1.2.2.6 Grado de mezclado (agitación) | 17 |
| 1.2.2.7 Tóxicos e inhibidores. | 18 |
| 1.2.2.7.1 Ácidos grasos volátiles | 18 |
| 1.2.2.7.2 Hidrógeno | 19 |
| 1.2.2.7.3 Nitrógeno amoniacal | 19 |
| 1.2.2.7.4 Sulfatos y sulfuro | 19 |
| 1.2.2.7.5 Cationes y metales pesados | 20 |
| 1.2.2.8 Otros inhibidores | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 1.3 El ganado bovino y la producción de excretas | 21 |
| 1.4 Desarrollo de la digestión anaerobia | 24 |
| 1.4.1 Digestión anaerobia a partir de las excretas de ganado bovino | 27 |
| 1.5 Reactores anaerobio | 28 |
| 1.5.1 Tipos y características de los reactores | 28 |
| 1.5.2 Dimensionamiento digestores anaerobios | 29 |
| 1.5.3 Tipos de digestores de bolsa | 29 |
| CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS | 32 |
| Metodología | 33 |
| 2.1 Características de las excretas de ganado bovino | 34 |
| 2.1.1 Determinación de sólidos totales y volátiles | 34 |
| 2.1.2 Determinación de pH | 35 |
| 2.1.3 Determinación de temperatura | 35 |
| 2.1.4 Determinación de demanda química de oxígeno | 35 |
| 2.2 Control de las condiciones de operación | 35 |
| 2.3.1 Factor de dilución | 36 |
| 2.3 Monitoreo del reactor de geomembrana | 37 |
| 2.4.1 Arranque del reactor | 37 |
| 2.4.2 Operación del reactor del modo estable | 38 |
| 2.4.3 Condiciones de salida | 40 |
| 2.4.4 Capacidad de generación de biogás | 40 |
| 2.4 Análisis de la composición de biogás | 41 |
| 2.5 Co-digestión a nivel laboratorio | 42 |
| 2.5.1 Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia | 42 |
| 2.5.2 Acondicionamiento de las muestras para las cinéticas | 43 |
| 2.5.3 Biodegradabilidad anaerobia (excretas – inóculo) | 43 |
| 2.5.4 Biodegradabilidad anaerobia co-digestión (excretas – inóculo – RSU) | 44 |
| CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 46 |
| 3.1 Caracterización de las excretas de ganado bovino | 47 |
| 3.2 Control de las condiciones de operación | 48 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 Monitoreo del reactor de geomembrana | 50 |
| 3.3.1 Operación en modo estable | 51 |
| 3.3.1.1 Medición de pH | 51 |
| 3.3.1.2 Temperatura | 52 |
| 3.4.2 Condiciones de entrada y salida | 53 |
| 3.4.3 Capacidad de generación de biogás | 55 |
| 3.4 Análisis de la composición de biogás | 56 |
| 3.4.1 Gestión del biogás producido para su aprovechamiento | 57 |
| 3.5 Co-digestión | 58 |
| 3.5.1 Biodegradabilidad anaerobia (excretas - inóculo) | 58 |
| 3.5.1.1 Caracterización de las excretas e inóculo | 58 |
| 3.5.1.2 DQO total y soluble (% de remoción) | 61 |
| 3.5.1.3 Sólidos Totales y Sólidos Volátiles (% de remoción) | 63 |
| 3.5.1.4 Comportamiento del pH | 65 |
| 3.5.1.4 Producción diaria y acumulada de biogás | 67 |
| 3.5.2 Biodegradabilidad anaerobia co-digestión (excretas – inóculo – RSU) | 69 |
| 3.5.2.1 DQO total y soluble co-digestión (% de remoción) | 71 |
| 3.5.2.2 Sólidos Totales y Sólidos Volátiles co-digestión (% de remoción) | 72 |
| 3.5.2.3 Comportamiento del pH co-digestión | 74 |
| 3.5.2.4 Producción diaria y acumulada de biogás co-digestión | 75 |
| 3.5.3 Comparación de la biodegradabilidad anaerobia excretas-inóculo contra la co-digestión | 77 |
| Conclusiones y recomendaciones | 79 |
| Referencias bibliográficas | 83 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1.1 Usos de las excretas de ganado bovino | 8 |
| Figura 1.2 Proceso de digestión anaerobia | 11 |
| Figura 1.3 Principales estados productores de ganado bovino | 23 |
| Figura 1.4 Generación anual promedio de RME en México | 26 |
| Figura 2.1 Metodología | 33 |
| Figura 2.2 Recolección de excretas | 37 |
| Figura 2.3 Preparación del sustrato | 37 |
| Figura 2.4 Alimentación del reactor | 38 |
| Figura 2.5 Tanque de salida | 38 |
| Figura 2.6 Pesaje de la muestra previo a su alimentación al reactor | 39 |
| Figura 2.7 Estandarización alimentación al reactor | 39 |
| Figura 2.8 Análisis de las condiciones de salida | 40 |
| Figura 2.9 Recolección de biogás | 41 |
| Figura 2.10 Equipo agitación orbital | 42 |
| Figura 3.1 Recolección de las excretas e inóculo para caracterizar | 47 |
| Figura 3.2 Esquema completo de la planta de biogás | 50 |
| Figura 3.3 Valores de pH | 51 |
| Figura 3.4 Temperatura | 52 |
| Figura 3.5 Porcentaje de remoción DQO_T y DQO_S | 53 |
| Figura 3.6 Porcentaje de remoción de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) | 54 |
| Figura 3.7 Producción de biogás | 56 |
| Figura 3.8 Conexión de biogás y parrilla | 57 |
| Figura 3.9 Productos obtenidos a partir del aprovechamiento del biogás | 58 |
| Figura 3.10 Muestras de excretas e inóculo | 58 |
| Figura 3.11 Preparación de la excretas para las cinéticas | 59 |
| Figura 3.12 Remoción con base a la DQO | 61 |
| Figura 3.13 Remoción con base a los sólidos totales y volátiles | 63 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 3.14 | Comportamiento del pH en las cinéticas | 65 |
| Figura 3.15 | Monitoreo de la producción diaria y acumulada de biogás | 67 |
| Figura 3.16 | Fracción semisólida de los residuos sólidos urbanos | 69 |
| Figura 3.17 | Remoción con base a su DQO de la co-digestión | 71 |
| Figura 3.18 | Remoción con base a los Sólidos Totales y Volátiles de la co-digestión | 72 |
| Figura 3.19 | Comportamiento del pH de la co-digestión | 74 |
| Figura 3.20 | Monitoreo de la producción diaria y acumulada de biogás co-digestión | 75 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. | |
|-----------|--|----|
| Tabla 1.1 | Producción anual de ganado bovino en México | 23 |
| Tabla 1.2 | Producción anual de ganado bovino en Veracruz | 24 |
| Tabla 1.3 | Diseños básicos para plantas de biogás | 30 |
| Tabla 1.4 | Ventajas y desventajas de las plantas de biogás | 31 |
| Tabla 2.1 | Principales parámetros a determinar | 34 |
| Tabla 2.2 | Relación de las proporciones de la cinética de degradación (excretas – inóculo) | 44 |
| Tabla 2.3 | Relación de las proporciones de la cinética de degradación co-digestión (excretas – RSU) | 44 |
| Tabla 2.4 | Parámetros analizados para la caracterización (excretas-inóculo-RSU) | 45 |
| Tabla 3.1 | Caracterización de las excretas | 48 |
| Tabla 3.2 | Caracterización de las excretas e Inóculo para las cinéticas | 60 |
| Tabla 3.3 | Relación sustrato-inóculo | 60 |
| Tabla 3.4 | Caracterización de las excretas, inóculo y RSU para la co-digestión | 70 |
| Tabla 3.5 | Relación sustrato-inóculo-RSU | 70 |
| Tabla 3.6 | Comparativo de las cinéticas | 77 |

NOMENCLATURA

| Abreviatura | Significado | Unidad |
|------------------|------------------------------------|------------------------|
| Cva | Carga Volumétrica Aplicada | Kg SV/m ³ d |
| DQO _T | Demanda Química de Oxígeno Total | g/L |
| DQO _s | Demanda Química de Oxígeno soluble | g/L |
| pH | Potencial de Hidrógeno | --- |
| RSU | Residuos Sólidos Urbanos | --- |
| SM | Standard Methods | --- |
| ST | Sólidos Totales | --- |
| SV | Sólidos Volátiles | --- |

INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia es uno de los procesos biológicos más antiguos conocidos y utilizados por el hombre, con el paso de los años esta tecnología se ha ido desarrollando en todo el mundo, su uso da como resultado grandes beneficios y es considerada como una de las tecnologías energéticas más eficientes y beneficiosas para el medio ambiente y la producción de bioenergía.

Las altas cargas volumétricas aplicadas y la baja producción de lodos se encuentran entre las muchas ventajas del proceso anaeróbico sobre otras operaciones biológicas. Mediante un manejo adecuado, el biogás puede ser utilizado para el suministro accesible y sostenible de energía y no tiene ningún efecto negativo sobre la salud humana y el medio ambiente.

Muchos estudios muestran la importancia del uso de la digestión anaerobia como una alternativa para el tratamiento de las excretas de ganado bovino, de este modo se ha convertido en objeto de estudio y en una opción interesante para proveer de un sistema que minimice la generación de estos residuos y sean aprovechados para la producción de energía en forma de biogás (metano) y como un subproducto obtener bioabono, que puede contribuir a la remediación y conservación de los suelos y del medio ambiente.

En México la aplicación de reactores de geomembrana o digestores de bolsa es una tecnología que se encuentra en estudio y desarrollo, en comparación con los reactores de domo fijo, los reactores de geomembrana tienen un bajo costo de construcción, perfil bajo de sofisticación, su mantenimiento no tiene complicaciones y está sujeto a menos variaciones climáticas (*Cheng et al.*, 2014).

Como resultado de las diferentes actividades productivas que desarrollan las sociedades, se generan inevitablemente una serie de desechos sólidos, líquidos o

gaseosos que pueden tener efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana (*SEMARNAT, 2012*).

La cantidad de residuos sólidos a nivel mundial crece aceleradamente debido al aumento de la población y a los avances tecnológicos orientados a satisfacer nuevos hábitos de consumo (*Larios y Ponce, 2011*).

De acuerdo a la en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) las excretas de ganado bovino son considerados residuos de manejo especial. Las excretas de vaca son el residuo no digerido de la materia vegetal que ha pasado por el intestino del animal, como resultado de este proceso es generada materia fecal la cual es rica en minerales (*SEMARNAT, 2012*). El estiércol de ganado se compone básicamente de hierba digerida y granos. El estiércol de vaca es rico en materia orgánica y rico en nutrientes. Contiene alrededor de 3% nitrógeno, 2% de fósforo, y 1% de potasio (*Iglesias, 1994*).

A nivel nacional de acuerdo a estadísticas (*SIAP, 2013*) en México hay más de ocho millones de cabezas de ganado bovino, las cuales producen aproximadamente más de ciento setenta mil toneladas anuales de estiércol. Parte de estas excretas son utilizadas como abono para los suelos, pero la parte que no es ocupada representa un grave problema para el medio ambiente.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar el estudio integral a un reactor anaerobio de geomembrana, el cual trata desechos de la industria de ganado bovino, con la finalidad de obtener la mejor producción de biogás.

OBJETIVOS.

Objetivo general.

Realizar el estudio integral de un reactor anaerobio de geomembrana, con la finalidad de mejorar su producción de biogás.

Objetivos particulares.

- a) Caracterizar las excretas del ganado bovino.
- b) Seguir y monitorear el reactor de geomembrana.
- c) Controlar las condiciones de alimentación y operación del reactor de geomembrana, para encontrar las condiciones óptimas para un alto rendimiento de metano a nivel laboratorio.
- d) Gestionar el biogás producido para su aprovechamiento.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Residuos orgánicos.

Como resultado de las diferentes actividades productivas que desarrollan las sociedades, se generan inevitablemente una serie de desechos sólidos, líquidos o gaseosos que pueden tener efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana (*SEMARNAT, 2012*).

El estudio de los residuos sólidos es de gran importancia debido a que pueden tener efectos tóxicos importantes y frecuentemente se depositan en lugares donde la población humana puede estar expuesta: calles, orillas de caminos, barrancas, cuerpos de agua, etc. La cantidad y tipo de desechos que se generan, depende, entre otras cosas, del grado de desarrollo industrial y de los servicios del país o región, así como de las mismas pautas de consumo de la sociedad (*CICEANA, 2015*).

La cantidad de residuos sólidos a nivel mundial crece aceleradamente debido al aumento de la población y a los avances tecnológicos orientados a satisfacer nuevos hábitos de consumo, muchas veces innecesarios (*Larios y Ponce 2011*).

1.1.1 Clasificación de los residuos

Para poder tratar los residuos y obtener buenos resultados es importante saber que hay distintos tipos y que se agrupan de diferentes maneras. Según su estado físico se clasifican en (*Larios y Ponce 2011*):

- Sólidos
- Líquidos
- Gaseosos

1.1.2 Procedencia de los residuos

Los residuos según su procedencia se clasifican en (*Larios y Ponce 2011*):

- **Industriales:** provienen de los procesos de producción, transformación, fabricación, utilización, consumo o limpieza.
- **Agrícolas:** son los que proceden de la agricultura, la ganadería, la pesca, las explotaciones forestales o la industria alimenticia.
- **Sanitarios:** son aquellos relacionados con el área de salud, están compuestos por residuos generados como resultado del tratamiento, diagnóstico o inmunización de humanos o animales.
- **Residuos sólidos urbanos:** son los que están compuestos por basura doméstica.

1.1.3 Peligrosidad

Según su peligrosidad los residuos se clasifican en (*Larios y Ponce 2011*):

- **Residuos tóxicos y peligrosos:** son los que por su composición química u otras características requieren tratamiento especial.
- **Radioactivos:** materiales que emiten radiactividad.
- **Inertes:** Son escombros y materiales similares; en general, no peligrosos para el ambiente, aunque algunos procedentes de la minería pueden contener elementos tóxicos.

1.1.4 Residuos de manejo especial

Los Residuos de Manejo Especial (RME) están definidos en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) como aquéllos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (*SEMARNAT, 2012*).

1.1.4.1 Residuos de ganado bovino.

De acuerdo a la en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) las excretas de ganado bovino son considerados residuos de manejo especial. Las excretas de vaca son el residuo no digerido de la materia vegetal que ha pasado por el intestino del animal, como resultado de este proceso es generada materia fecal la cual es rica en minerales. El estiércol de ganado se compone básicamente de hierba digerida y granos. El estiércol de vaca es rico en materia orgánica y rico en nutrientes. Contiene alrededor de 3% de nitrógeno, 2% de fósforo, y 1% de potasio (*Iglesias, 1994*).

Los residuos generados por el ganado bovino, se utilizan comúnmente como fertilizante para la tierra. Si no se recicla en el suelo por especies como las lombrices y los escarabajos peloteros, el estiércol de vaca puede secarse y permanecer en el pasto, creando un área de terreno de pastoreo, que es difícil de aceptar para el ganado. En muchas partes del mundo en desarrollo, y en el pasado en las regiones montañosas de Europa, apelmazan el estiércol seco de la vaca y se utiliza como combustible. También puede ser recogida y utilizada para producir biogás para generar electricidad y calor. El gas es rico en metano y se utiliza en las zonas rurales de India / Pakistán y otros países para proporcionar una fuente renovable como la electricidad (*Wallace y Safferman, 2013*).

En África central, en la región de Masai, Kenia han quemado estiércol de vaca para repeler mosquitos. Como se puede observar en la figura 1.1, en lugares fríos, el estiércol de vaca se utiliza para forrar las paredes de las casas rústicas como un barato aislante térmico. También un ingrediente opcional en la fabricación de ladrillos de barro para las viviendas en función de la disponibilidad de materiales a mano (Wallace y Safferman, 2013).



Figura 1.1. Usos de las excretas de ganado bovino.

1.2 Digestión anaerobia.

La digestión anaerobia se encuentran entre las tecnologías de procesos biológicos más antiguos utilizados por el hombre; Se han aplicado y desarrollado a lo largo de muchos siglos, a pesar de ello los avances más importantes se han realizado en las últimas décadas con la introducción de varios procesos de alto rendimiento especialmente en el tratamiento de aguas residuales industriales (Bastone *et al.*, 1999).

Las altas cargas volumétricas aplicadas (Cva, gDQO/L d) y la baja producción de lodos se encuentran entre las muchas ventajas del proceso anaeróbico sobre otras operaciones biológicas. Pero la única característica que emerge como un importante motor para el aumento de la aplicación de los procesos anaeróbicos es la producción

de energía. No sólo esta tecnología tiene una producción neta de energía positiva, además el biogás producido también puede reemplazar las fuentes de combustibles fósiles y por lo tanto tiene un efecto positivo en la reducción de gases de efecto invernadero.

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico el cual es normalmente catalizado por enzimas que actúan intracelular o extracelularmente en el material orgánico disponible. La desintegración de los materiales (tales como la biomasa muerta) a partículas de menor complejidad y su posterior hidrólisis enzimática de monómeros solubles es el paso inicial para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos. La digestión de los materiales solubles mediados por los organismos es intracelular y este proceso resulta en el crecimiento de la biomasa (Bastone *et al.*, 1999).

El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados. Puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. (Martí, 2006).

La digestión anaerobia también es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica, como las producidas en muchas industrias alimentarias.

Los objetivos de los digestores anaeróbicos son destruir una porción significativa de los sólidos volátiles en los lodos y minimizar la putrefacción de los lodos. Los principales productos de digestores anaeróbicos son el biogás y los inocuos sólidos de lodos digeridos. El biogás se compone principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), (Martí, 2006).

1.2.1 Etapas de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia se lleva a cabo por los microorganismos que sólo puede vivir en un ambiente libre de oxígeno. La descomposición de los residuos orgánicos se produce en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La digestión anaerobia se divide en tres etapas principales:

- Hidrólisis
- Acidogénesis – Acetogénesis
- Metanogénesis

La primera etapa es la hidrólisis que es la ruptura y solubilización del material orgánico complejo a sustratos solubles. Los sustratos son partículas complejas compuestas de carbohidratos, lípidos y proteínas, otros productos de desintegración son elementos inertes y material inerte soluble. La desintegración del material orgánico se lleva a cabo por enzimas y los productos de la degradación de carbohidratos, proteínas y lípidos son monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga, respectivamente. Los productos de la hidrólisis son consumidos por las bacterias fermentativas y luego excretadas principalmente en forma de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) como por ejemplo ácido acético, propiónico, butírico, láctico y valérico (*Bastone et al., 1999*).

La segunda fase del proceso de digestión anaerobia es la acidogénesis, en esta etapa los compuestos generados de la fase anterior son fermentados a través de las bacterias acidogénicas, estas bacterias degradan los azúcares solubles, aminoácidos y ácidos grasos en compuestos solubles más simples, dando como resultado la formación a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Dentro de la segunda fase se encuentra la acetogénesis la cual es la degradación de los ácidos orgánicos superiores a acetato. Los organismos oxidantes del ácido orgánico (normalmente bacterias) transforman los ácidos grasos

de cadena corta en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por medio de microorganismos acetogénicos para producir gas hidrógeno o formiato respectivamente (Martí, 2006).

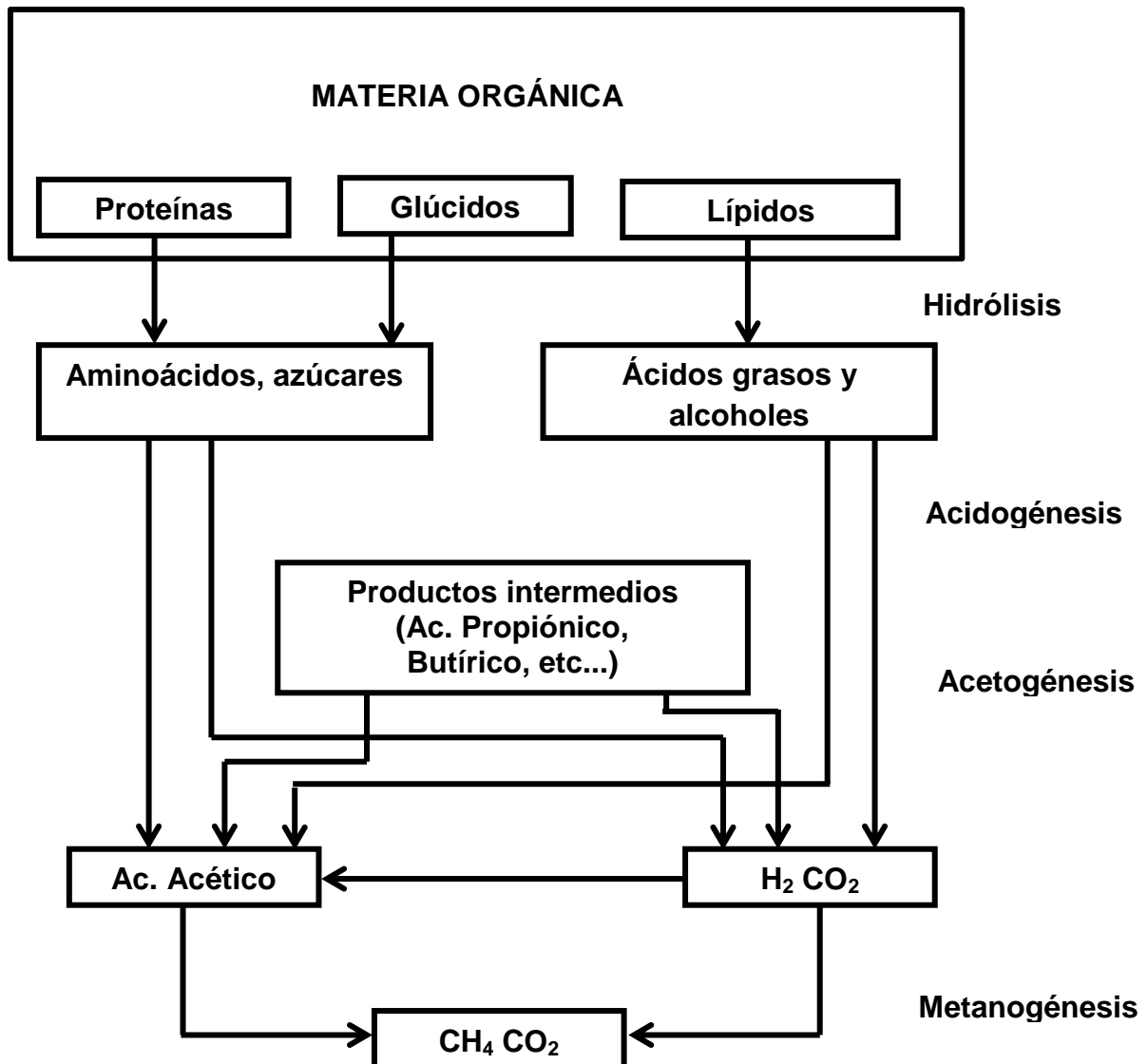


Figura 1.2. Proceso de digestión anaerobia (Bastone et al., 1999).

La última etapa y más importante es la metanogénesis, en ésta se produce la remoción de la materia orgánica y la recuperación de energía en forma de metano. Para esta última parte del proceso los microorganismos metanogénicos producen metano y dióxido de carbono a partir de ácido acético.

Dentro de la metanogénesis se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan o (*Bastone et al., 1999*):

- Hidrogenotróficos: que consumen hidrógeno, dióxido de carbono y ácido fórmico
- Acetoclásticos: que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Además del correcto equilibrio en la fase de la metanogénesis y las anteriores depende la estabilidad del proceso. Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles, que podría producir una bajada del pH. Para la estabilidad del pH es importante el equilibrio CO₂-bicarbonato. Para hacer posible algunas reacciones es necesaria la asociación sintrófica entre bacterias acetogénicas y metanogénicas, creando agregados de bacterias de estas diferentes poblaciones. Lo anterior implica que las puestas en marcha de los reactores sean, en general, lentas, requiriendo tiempos que pueden ser del orden de meses (*Martí, 2006*).

Estas limitaciones hacen que los tiempos del proceso sean del orden de semanas, de dos a tres. Para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pretratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la solubilización (maceración, ultrasonidos, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperaturas).

La digestión anaerobia es una tecnología la cual a partir residuos orgánicos se puede generar energía, para lograr este objetivo los microorganismos descomponen la materia orgánica y como resultado de la descomposición de esta materia se genera como producto final un gas de alto contenido energético, llamado biogás,

formado fundamentalmente por metano (50 – 80%), dióxido de carbono (20 – 50%) y trazas de otros elementos como sulfuro de hidrógeno (*Martí, 2006*). Las bacterias productoras de ácidos transforman la materia orgánica compleja, en productos intermedios. Las bacterias productoras de metano actúan sobre dichos productos intermedios transformándolos en gases y subproductos estabilizados.

El proceso que se origina es lento y requiere unas condiciones determinadas. La primera fase del proceso se denomina fase ácida, con pH por debajo de 6.8, la segunda fase se denomina metánica, la cual aumenta el pH a valores de 7.4, estas bacterias son muy sensibles a los valores de pH y se inhiben con valores inferiores a 6 (*De la Torre, 2008*).

1.2.2 Factores que regulan el proceso de digestión anaerobia.

Diversos factores tienen una gran influencia en la estabilidad del proceso de digestión anaerobia. La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversas causas. Debido a que cada grupo de bacterias participantes en las distintas etapas del proceso responde de forma diferente a esos cambios no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa (*Martí, 2006*).

Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes:

- Tipo de sustrato (nutrientes)
- Temperatura
- Tiempo de retención hidráulico
- Carga Volumétrica Aplicada (Cva)
- Nivel de acidez (pH)

- Grado de mezclado (agitación)
- Tóxicos e inhibidores

1.2.2.1 Tipo de sustrato (nutrientes disponibles).

Una de las ventajas de la digestión anaerobia es la baja necesidad de nutrientes, derivada de su pequeña velocidad de crecimiento. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimento de las bacterias formadoras de metano. Por tanto, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) tiene una gran importancia para el proceso fermentativo recomendándose una relación 20-30 como el óptimo (*Blanco, 2011*).

1.2.2.2 Temperatura.

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayores producciones de biogás (*De la Torre, 2008*).

La temperatura de operación en el digestor, está considerada uno de los principales parámetros de diseño, ya que variaciones bruscas de temperatura en el mismo, pueden provocar desestabilización en el proceso. Uno de los principales factores que influyen sobre la digestión anaerobia es la temperatura, debido a que el proceso se ve afectado directamente en la actividad y tiempo de generación de los microorganismos con lo que ejerce una fuerte influencia sobre el proceso. Podemos considerar tres rangos de temperatura (*Marti, 2006*).

- Psicofílico por debajo de los 25° C
- Mesofílico: entre 25 y 45° C
- Termofílico: 45 y 65° C

Siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor conforme aumenta el rango de temperaturas.

1.2.2.3 Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).

El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digester (*Sanz, 2013*). En los sistemas de mezcla completa, el tiempo de retención hidráulico (TRH) coincide con el celular, por lo que el tiempo de retención deberá ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana. Al aumentar el TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada así como la producción de metano, aunque este último valor comenzará a disminuir una vez alcanzado el óptimo. El tiempo de retención usual en el rango mesofílico para lodos de depuradora está entre 15 y 20 días, aunque este valor depende mucho del tipo de reactor utilizado (*Martí, 2006*)

El tiempo de retención es el cociente entre el volumen del digester y el caudal de alimentación, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos, para alcanzar los niveles de energía y/o reducción de la carga contaminante que se hayan prefijado.

$$TRH = \frac{\text{volumen del digester (m}^3\text{)}}{\text{caudal de alimentacion (}\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\text{)}} \quad (1)$$

1.2.2.4 Carga volumétrica aplicada (Cva).

Es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el digestor, expresada normalmente en sólidos volátiles, por unidad de volumen y tiempo, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogás aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor (*Martí, 2006*).

1.2.2.5 Nivel de acidez (pH).

El pH debe mantenerse próximo a la neutralidad, pudiendo tener fluctuaciones entre 6.5 y 7.5. Su valor en el digestor no solo determina la producción de biogás sino también su composición.

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaerobia presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad entre los siguientes valores (*Martí, 2006*):

- Fase fermentativa: 7.2 – 7.4
- Fase acetogénica: 7.0 – 7.2
- Fase metanogénica: 6.5 – 7.5

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6 ni subir de 8. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. 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.

El pH es una de las variables utilizadas en el diagnóstico de los sistemas anaerobios (aunque no se considera una buena variable de control por ser demasiado lenta) ya que muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Un ejemplo de ello, son las situaciones de acidificación de un reactor anaerobio provocadas por desequilibrios en la producción y consumo de ácidos grasos volátiles. La acumulación de éstos provoca un descenso en el pH que será más o menos acusada en función de la alcalinidad del medio (*Blanco, 2011*).

1.2.2.6 Grado de mezclado (agitación).

Diversos experimentos muestran que un adecuado mezclado del contenido del digestor es esencial y persigue los siguientes objetivos (*Martí, 2006*):

- Poner en contacto el sustrato fresco con la población bacteriana y eliminar los metabolitos producidos por los microorganismos metanogénicos al favorecer la salida de los gases.
- Proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana.
- Prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.
- Prevenir la formación de espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del reactor y la formación de caminos preferenciales
- Eliminar la estratificación térmica, manteniendo una temperatura uniforme en todo el reactor.

El sistema de agitación puede ser mecánico, hidráulico y neumático. La velocidad de agitación debe ser suficientemente fuerte para asegurar una correcta homogeneización pero sin romper los agregados bacterianos (*Martí, 2006*).

1.2.2.7 Tóxicos e inhibidores.

Las sustancias inhibidoras son compuestos que bien están presentes en el residuo antes de su digestión o bien se forman durante el proceso fermentativo anaerobio. Estas sustancias reducen el rendimiento de la digestión e incluso pueden llegar a causar la desestabilización completa del proceso. A determinados niveles los AGV generan serios problemas de inhibición sobre todo en combinación con niveles bajos de pH. Otros problemas de inhibición son los causados por el amonio, el ácido sulfhídrico, o los ácidos grasos de cadena larga. Los pesticidas, desinfectantes o antibióticos presentes en algunos subproductos también pueden llegar a afectar el proceso según su concentración.

El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de tóxicos en el sistema. Estas sustancias pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios o pueden formar parte del influente. Experimentalmente se ha comprobado que la magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede reducir significativamente por aclimatación de la población de microorganismos al tóxico. Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso (Martí, 2006).

1.2.2.7.1 Ácidos grasos volátiles.

La concentración de ácidos grasos volátiles, productos intermedios mayoritarios del proceso anaerobio, es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema (Sanz, 2013).

Un ejemplo de ello, es la acumulación de ácidos grasos volátiles que tiene lugar en el sistema cuando la velocidad de degradación de éstos, por parte de las bacterias

responsables, disminuye por alguna causa adversa. Por tanto, un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, siempre significa una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás.

1.2.2.7.2 Hidrógeno.

El hidrógeno es también un compuesto intermedio importante del proceso anaerobio. Su acumulación en el medio, tal y como se vio en el apartado 2.3.3, provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono (*De La Torre, 2008*).

1.2.2.7.3 Nitrógeno amoniacal.

Durante el proceso anaerobio, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento.

El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio (NH_4^+) y del amoníaco (NH_3). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH. De las dos especies, la que parece inhibir el proceso es el amoníaco libre ya que se ha comprobado experimentalmente que el efecto inhibitorio por amonio aumenta a pH alcalinos.

1.2.2.7.4 Sulfatos y sulfuros.

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaerobio, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los

mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competición determinará la proporción de sulfhídrico y metano en el biogás producido (Sanz, 2011).

Por tanto, la inhibición tiene dos etapas, la primera debida a la competición por el sustrato entre los microorganismos metanogénicos y sulfato-reductores y la segunda es una inhibición directa del crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles.

1.2.2.7.5 Cationes y metales pesados.

Los cationes de metales alcalinos y alcalino-térreos tienen un efecto estimulador de la actividad de las bacterias a bajas concentraciones. A partir de un nivel de concentración, pueden proporcionar toxicidad provocando una disminución de la velocidad de crecimiento.

La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan toxicidad a menor concentración. El orden de toxicidad de los metales pesados es $Ni > Cu > Cr(IV) \approx Cr(III) > Pb > Zn$ (Sanz, 2011).

Los niveles de inhibición varían en función de varios factores. Si la introducción del catión en el reactor se produce de forma gradual, los microorganismos pueden aclimatarse y el efecto tóxico es menor. La presencia de sulfuros también disminuye la inhibición debido a la precipitación de éstos con los metales pesados, pudiendo llegar a tolerarse elevadas concentraciones de metales pesados en estos casos.

Cuando se presentan combinaciones de cationes, el efecto producido es más complejo. Algunos actúan antagónicamente, reduciendo la toxicidad y otros actúan sinérgicamente aumentándola.

1.2.2.8 Otros inhibidores.

Debido a que la etapa de fermentación metánica tiene etapas realizadas por microorganismos estrictamente anaerobios, es obvio que el oxígeno es un tóxico más del proceso. Parece que concentraciones del orden de 1µg/l son inhibitoras.

También podemos señalar como inhibidores del proceso: el pH, determinadas sustancias orgánicas como ácidos grasos de cadena larga y alcoholes, en elevadas concentraciones, y la presencia de desinfectantes y antibióticos (*Marti, 2006*).

1.3 El ganado bovino y la producción de excretas.

La industria de ganado bovino es muy importante en México por su doble aportación en la alimentación del hombre (carne y leche), además de la generación de divisas con la exportación de ganado y por su contribución al desarrollo rural.

Los avances tecnológicos en materia de nutrición han generado nuevas formas de alimentación para los bovinos, tanto de tipo cárnico, como lechero. Por consiguiente los sistemas de producción bovina tienen que enfocarse sobre este aspecto fundamental del proceso (*Gasque, 2008*).

En los países industrializados, los sistemas de producción animal empujados por la globalización de los mercados agrícolas y el aumento de la competencia, han experimentado un cambio hacia la especialización y el aumento del tamaño de las explotaciones (*Blanco, 2011*).

El ganado bovino son animales forrajeros por naturaleza, esto quiere decir que las pasturas o forrajes son alimentos con los que cubren sus necesidades clave: mantenimiento, crecimiento, preñez y desarrollo corporal. Las nuevas formas de alimentación se basan en el uso masivo de alimentos concentrados que se integran a las dieta en las diferentes etapas del ciclo productivo y con diferentes propósitos. Los nutrientes claves en la alimentación bovina son (*Gasque, 2008*):

- Energía
- Proteína
- Fibra
- Grasas
- Macro y microminerales
- Vitaminas

El ganado bovino es un rumiante el cual cuenta con cuatro compartimentos gástricos (estómagos) en función: el rumen, el retículo, el amaso y el abomaso. Estos estómagos tienen diferentes funciones en el proceso de la digestión de sus alimentos constituidos básicamente por forrajes y granos. Entre los granos y forrajes comúnmente empleados para alimentar a los bovinos se encuentran: la alfalfa, sorgo, maíz, cebada, avena y diversos pastos, entre otros (*SAGARPA, 2003*).

En México se generan millones de toneladas de estiércol a partir de la industria del ganado bovino, como resultado de la generación de estos residuos las excretas o estiércol de los animales, como comúnmente se conocen son utilizados como fertilizantes de suelos. El estiércol no presenta problema alguno en volúmenes bajos, pero se convierten en un problema cuando hay excedentes de este y es cuando empieza a afectar al ambiente.

En la Tabla 1.1, se muestra la producción anual en México de cabezas de ganado y un estimado del estiércol generado anualmente, el factor para obtener el estiércol

producido resulta de multiplicar las cabezas de ganado por 20 Kg que es aproximadamente lo que una vaca genera de estiércol en un día y así se obtienen los kilogramos de estiércol anuales.

Tabla 1.1 Producción anual de ganado bovino en México (SIAP, 2013 modificada).

| Año | Cabezas de ganado | Estiércol (Kg) |
|------|-------------------|----------------|
| 2009 | 8 031 270 | 160 625 400 |
| 2010 | 8 333 683 | 166 673 660 |
| 2011 | 8 540 138 | 170 802 760 |
| 2012 | 8 661 953 | 173 239 060 |
| 2013 | 8 514 603 | 170 292 060 |

En la figura 1.3 se puede observar que los estados de Veracruz, Jalisco, Chiapas, Chihuahua, Sinaloa, Michoacán y Sonora representan el 50% de la producción nacional, el otro 50% está compuesto por los estados de Baja California, Tabasco, Durango y resto del país.

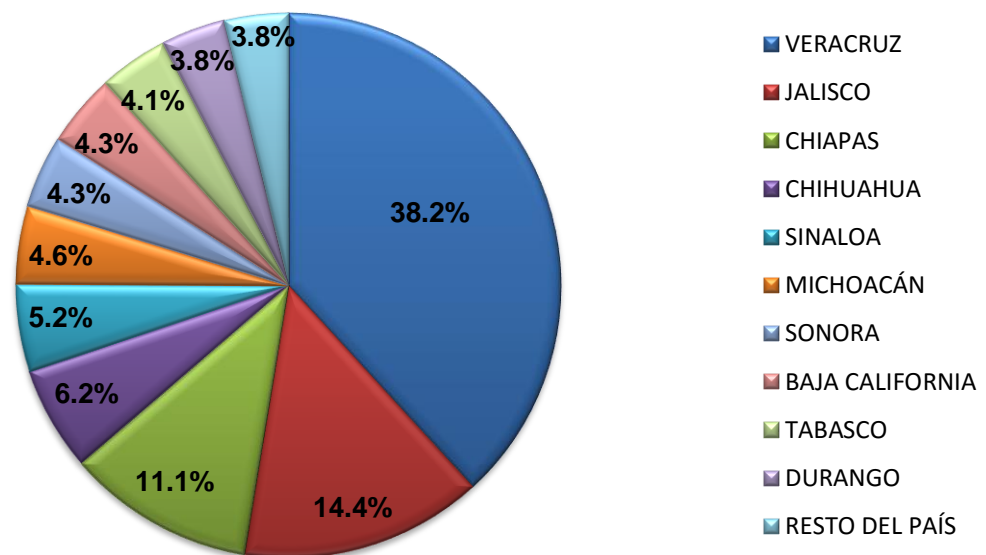


Figura 1.3. Principales estados productores de ganado bovino, Financiera rural 2009.

A nivel nacional de acuerdo a estadísticas (SIAP 2013), Veracruz es el primer productor de ganado bovino. En la tabla 1.2, se muestra la producción anual de cabezas de ganado y de estiércol generada en el estado de Veracruz.

Tabla 1.2 Producción anual de ganado bovino en Veracruz (SIAP, 2013 modificada).

| Año | Cabezas de ganado | Estiércol (Kg) |
|------------|--------------------------|-----------------------|
| 2009 | 1 163 708 | 22 274 160 |
| 2010 | 1 241 095 | 24 821 900 |
| 2011 | 1 256 270 | 25 125 400 |
| 2012 | 1 202 745 | 24 054 900 |
| 2013 | 1 162 450 | 23 249 000 |

Martínez et al., 2009, realizaron una encuesta sobre los ranchos en la zona montañosa en el estado de Veracruz, el 66% de ellos se encuentra en terrenos planos alternados con laderas y a una altitud de 1 200 a 1 600 m. Su superficie varía de 1 a 80 hectáreas, aunque el 56 % de ellos tienen de 5 a 20 hectáreas. En estos ranchos hay un total de 1,700 cabezas de ganado bovino, encontrándose de 10 a 20 cabezas por cada rancho, esto nos puede dar una perspectiva del estiércol generado por estas cabezas de ganado, el cual puede ser suficiente para poder ser utilizado en un digestor anaerobio y así producir biogás para uso de los ranchos.

1.4 Desarrollo de la digestión anaerobia.

El agotamiento continuo de combustibles fósiles trae como resultado la búsqueda de nuevas fuentes de energía. Las posibles fuentes de energía se han convertido en fuentes de energía renovables.

Durante mucho tiempo fuentes múltiples de energía renovable están siendo investigados debido a que en zonas rurales existe cierta dependencia de utilizar leña, carbón vegetal o combustibles fósiles para obtener energía y la tasa de consumo de energía cada vez va en aumento. La combustión de combustibles fósiles ha provocado graves problemas de contaminación del aire, del mismo modo el consumo excesivo de madera para uso como leña causa deforestación a gran escala (*Yimer et al., 2014*).

La digestión anaerobia se introdujo en países en desarrollo debido a su bajo costo y como una fuente alterna de energía para contrarrestar el problema de escasez energético en algunos hogares, reduciendo así la deforestación y erosión del suelo.

Una nueva tecnología que puede ser aplicada en la digestión anaerobia son los reactores de membrana o digestores de bolsa, estos reactores en varias partes del mundo son construidos de diferentes formas. Estas planta de biogás son construidas a partir de una geomembrana plástica en forma cilíndrica, en este sentido se ha hecho un esfuerzo por introducir la geomembrana de plástico como planta de biogás, haciendo una comparación del rendimiento de gas y lodo, además de un análisis de viabilidad económica con los biodigestores de cúpula fija.

La digestión anaerobia se ha promovido en todo el mundo durante las últimas décadas, y su uso ha llevado al reconocimiento de los muchos beneficios de digestores de biogás doméstico. La digestión anaerobia aplicada para dar tratamiento a los residuos de la industria ganadera ha demostrado ser un tratamiento atractivo que proporciona varios beneficios, tales como; reducción de olores, agentes patógenos, producción de fertilizantes y generación de energía renovable en forma de biogás (*Rico, 2011*).

Las excretas de ganado de acuerdo a (SEMARNAT, 2012) son considerados como Residuos de Manejo Especial (RME), los cuales están definidos en la Ley General

para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) clasificando a los residuos de manejo especial en ocho categorías según su origen:

- Residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades.

Un estudio realizado por SEMARNAT 2012 muestra que el mayor volumen de generación anual promedio correspondió a las excretas de ganado (porcino y bovino lechero; cerca de 66.7 miles de toneladas), seguido por papel y cartón (6 820 toneladas) y los residuos de la construcción y demolición (6 111 toneladas; Figura 1.4).

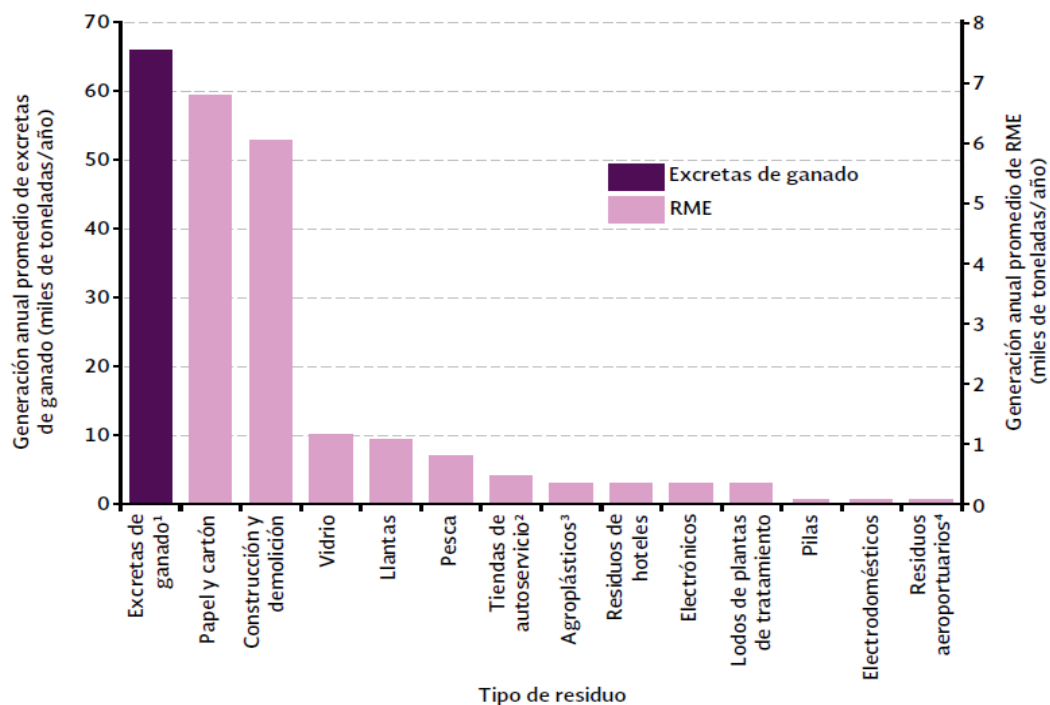


Figura 1.4. Generación anual promedio de RME en México SEMARNAT 2012.

Con un manejo adecuado, el biogás puede ser utilizado para el suministro accesible y sostenible de energía y no tiene ningún efecto negativo sobre la salud humana y el medio ambiente.

Sin embargo la construcción de los reactores tradicionales es complicada, los altos costos de inversión y mantenimiento dificultan la operación de digestores mecánicamente equipados, esto ha alentado a los agricultores a adoptar sistemas anaerobios más sencillos y baratos (*Cheng et al., 2014*).

1.4.1 Digestión anaerobia a partir de excretas bovinas.

El uso de la digestión anaerobia como una alternativa para el tratamiento de las excretas de ganado bovino, se ha convertido en objeto de estudio y en una opción interesante para proveer de un sistema que minimice la generación de estos residuos y puedan ser aprovechados para la producción de energía en forma de biogás (metano) y como un subproducto obtener bioabono que puede contribuir a la remediación y conservación de los suelos y del medio ambiente.

El tratamiento de estiércol de ganado bovino por digestión anaerobia es de interés creciente, debido a que ofrece ventajas simultáneas, una de las más importantes es la producción de energía renovable.

En muchas plantas de digestión anaerobia se produce biogás a partir de estiércol de animales, pero suele ser demasiada baja su producción de biogás, debido a que a menudo suelen utilizar estiércol con un alto contenido de agua lo que lo hace bajo en carbono y no favorece la producción de metano.

Un método para aumentar el rendimiento de biogás en términos de volumen es aumentar la concentración de Sólidos Volátiles (SV), es decir se usa la fracción sólida del estiércol. Además de aumentar la producción de metano por unidad de masa, ofrece ventajas en la temperatura del biodigestor, en el rendimiento de biogás, lo que ayuda a que aumente el valor del material digerido y se use como fertilizante. (*Alastair y Bjarne, 2012*).

Estudios previos demuestran que la digestión de los sustratos mejora la estabilidad del proceso, en comparación con la digestión de los sustratos por separado. El rendimiento de metano puede ser favorecido mediante la optimización de la composición del sustrato.

A pesar de la gran cantidad de literatura sobre la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia, existe solo un número limitado de estudios sobre la co-digestión. Esta tecnología utiliza dos componentes como sustratos, tales como residuos de alimentos o cultivo y el estiércol animal (*Ashekuzzaman y Poulsen, 2011*).

1.5 Reactores anaerobios

Los digestores anaerobios son un proceso centralizado de manejo de cualquier tipo de residuo orgánico, los cuales son enviadas a un biodigestor, con un sistema de agitación y remoción de lodos, una laguna secundaria, un sistema de recolección, conducción y utilización del biogás para generación de energía eléctrica y un quemador.

1.5.1 Tipos y características de los reactores.

Los reactores biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales pueden ser divididos en dos grandes grupos en base a tipo de crecimiento microbiano:

1. De lecho fijo, formando biopelículas,
2. De crecimiento libre o suspendido.

En los primeros la biomasa está constituida por bacterias formando una película sobre un soporte inerte, mientras que los segundos dependen de que los microorganismos formen gránulos o flocúlos en el reactor.

Por otro lado las bacterias que crecen en suspensión deben de formar estructuras que las permitan permanecer en el reactor y no ser lavadas con el efluente, y la eficiencia del proceso depende en buena parte de la capacidad del inóculo (lodos/residuos) para formarlas.

1.5.2 Dimensionamiento digestores anaerobios.

Para el dimensionamiento de los sistemas de biodigestión se considerarán factores, que permitan, en primera instancia, conocer la cantidad real disponible del residuo orgánico dentro la unidad productiva, así como una serie de factores que se describirán a continuación.

- Tipo y disponibilidad de la biomasa
- Características Físicas, Química y Biológicas de la biomasa
- Aspectos Geográficos de la zona

Las plantas de biogás son un contenedor cerrado en el que se desarrolla una fermentación anaerobia de todo el material orgánico y con el objetivo de producir biogás.

1.5.3 Tipos de digestores de bolsa.

Los digestores de bolsa se derivan de los digestores tradicionales. Los países en desarrollo utilizan tres tipos principales de digestores tradicionales:

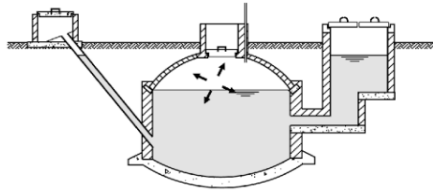
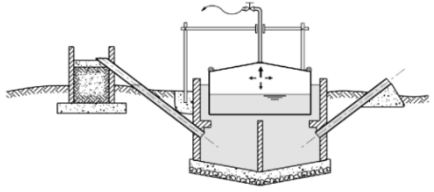
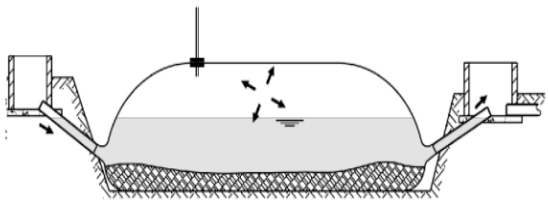
1. Digestor de cúpula fija
2. Digestor de tambor flotante
3. Digestor de flujo pistón

Los digestores anaerobios de bolsa no tienen una clasificación exacta, normalmente son llamados “digestores comercializados”. Estos digestores también se llaman “nuevos digestores”, debido a que para su construcción pueden ser de diferentes materiales, además los procesos y técnicas para su montaje pueden variar. Los digestores comerciales se pueden clasificar de acuerdo al tipo de material como (Cheng et al., 2014):

- Fibra de plástico reforzado
- Plástico blando
- Plástico duro

Para la construcción de los digestores anaerobios existen tres diseños básicos de planta de biogás los cuales se muestran en la tabla 1.3, (Cheng et al., 2014).

Tabla 1.3 diseños básicos para plantas de biogás (Guardado Chacón J. A., 2007).

| | |
|---|--|
| Digestor de domo fijo |  |
| Digestor de tambor flotante |  |
| Digestor de flujo pistón/ Digestor de bolsa |  |

En la Tabla 1.4 se describen las ventajas y desventajas de los digestores comúnmente usados para plantas de biogás.

Tabla 1.4 Ventajas y desventajas de las plantas de biogás. (Cheng et al., 2014).

| Tipo de digestor | Ventajas | Desventajas |
|---|--|---|
| Digestor de domo fijo | <p>Bajo costo inicial.</p> <p>Vida larga útil.</p> <p>No hay movimiento o partes de óxidos involucradas.</p> <p>Diseño básico compacto.</p> <p>Requiere menos tierra si se construye subterráneo.</p> <p>Bajo mantenimiento.</p> | <p>Requiere de altas habilidades técnicas para la construcción hermética al gas.</p> <p>Difícil de reparar en caso de fuga.</p> <p>Requiere de materiales de construcción pesado.</p> <p>La cantidad de gas producido no es inmediatamente visible.</p> |
| Digestor de tambor flotante | <p>Operación simple y fácil de entender.</p> <p>Volumen de gas almacenado Visible.</p> <p>Presión de gas constante.</p> <p>Relativamente fácil construcción.</p> | <p>Alto costo de materiales, debido al tambor de acero.</p> <p>Esperanza de vida corta debido a la corrosión del tambor de acero.</p> <p>Alto mantenimiento debido a la pintura regular de tambor.</p> |
| Digestor de flujo pistón / Digestor de bolsa | <p>Bajo costo.</p> <p>Facilidad de transporte.</p> <p>Perfil bajo de sofisticación</p> <p>Mantenimiento sin complicaciones.</p> <p>Sujeto a menos variaciones climáticas de tipo domo fijo.</p> | <p>Relativamente corta vida.</p> <p>Alta susceptibilidad al daño.</p> <p>Baja presión de gas.</p> <p>Creación limitada de empleo local</p> <p>Alto impacto en el medio ambiente, menos amigable con el medio ambiente</p> |

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos planteados, en este capítulo se describen las diversas actividades realizadas. En la Figura 5 se representa la metodología experimental del estudio integral del reactor de geomembrana.

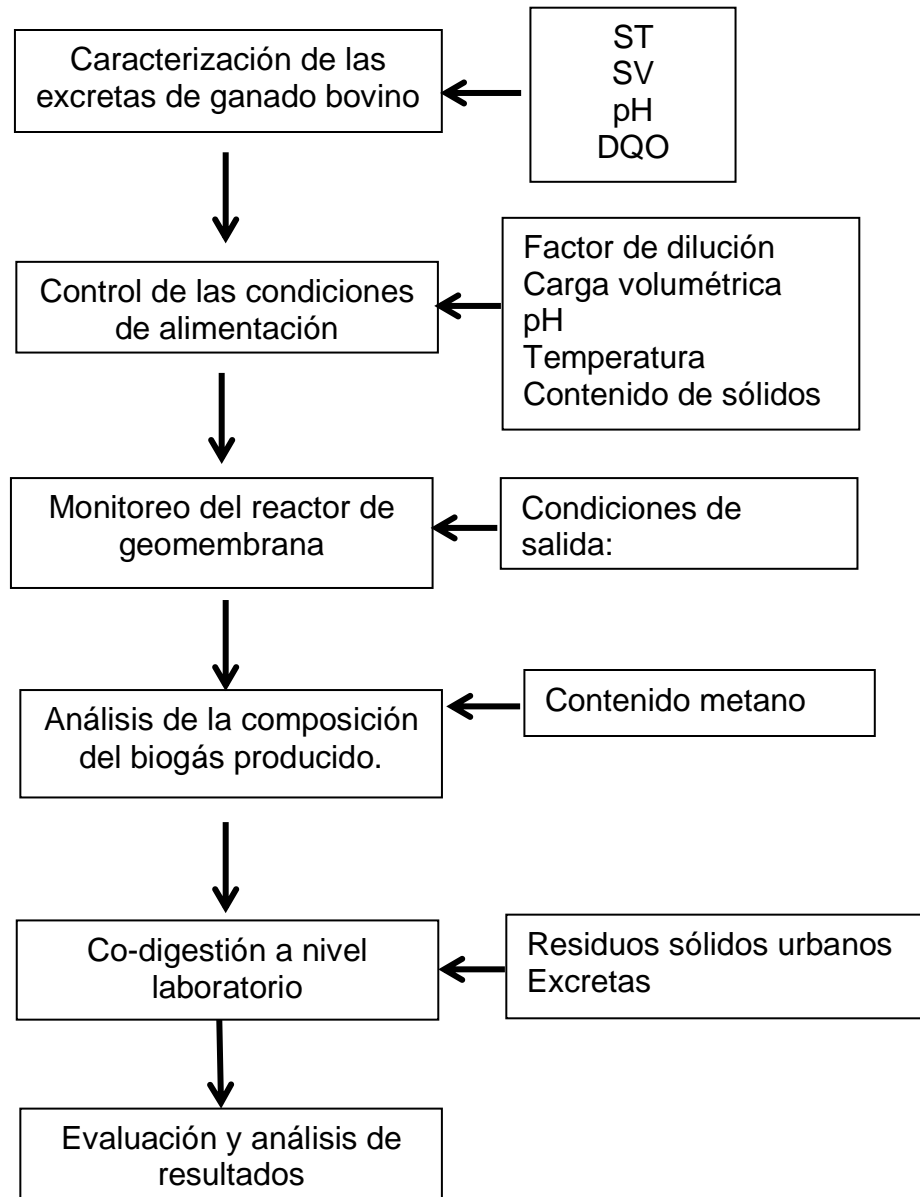


Figura 2.1 Metodología.

2.1 Caracterización de las excretas de ganado bovino.

Para la caracterización de las excretas se realizaron una serie de pruebas para la medición de parámetros fisicoquímicos del sustrato para esto se utilizan las técnicas analíticas apoyadas en los Métodos Estandarizados.

Los análisis consisten en realizar una serie de determinaciones a las muestras de alimentación en la entrada del reactor, así como a la salida del reactor de geomembrana, también se realizaron pruebas analizando el biogás generado por el reactor.

Tabla 2.1 Principales parámetros a determinar.

| Determinación | Unidad | Método |
|---|---------------|--------------------------------------|
| DQO Total | g/L | Micro método colorimétrico 5220 D SM |
| Sólidos Totales | g/L | Gravimétrico |
| Sólidos Volátiles | g/L | Gravimétrico |
| pH | [--] | Potenciométrico |
| Volumen de biogás | L | Volumétrico |
| Composición de biogás Metano, dióxido de carbono | % | Cromatografía de gases |
| *SM= Standard Methods (APHA, 1995) | | |

2.1.1 Determinación de sólidos totales y volátiles.

La determinación de sólidos se realizó por el método gravimétrico, para el caso de los sólidos totales se utiliza una estufa Riotta Modelo H-33 para eliminar toda la humedad que pueda contener la muestra y para los sólidos volátiles se utiliza una mufla Furnace 1300 Barnstead/thermolyne para la calcinación y volatilización de la materia orgánica. La determinación de los sólidos se hace en base a una diferencia de peso en gramos utilizando una balanza analítica Adventurer Ohaus.

2.1.2 Determinación de pH.

La determinación de pH se realizó en un potenciómetro marca ORION Research Inc. Model 250 A. de acuerdo al método Potenciométrico 4500-H B de Stándar Methods (APHA, 1995).

2.1.3 Determinación de temperatura.

La medición de la temperatura ésta se realizó a través de un termómetro de mercurio de inmersión total, en unidades de ° Celsius, marca Brannan.

2.1.4 Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La demanda química de oxígeno total y soluble se realizó por el Micro método colorimétrico 5220 D Standard Methods, utilizando una centrífuga Beckman Allegra para centrifugar las muestras y obtener la DQO soluble, para la determinación de la DQO total y soluble se utiliza una placa digestora COD-Reactor marca Hach para realizar el suministro de calor a la reacción, para pipetear se utilizan pipetas automáticas Eppendorf Research para las diversas determinaciones y por último se utiliza un espectrofotómetro ODYSSEY DR2500 marca Hach para realizar la lectura de transmitancia de las muestras.

2.2 Control de las condiciones de alimentación.

El diseño del reactor se basó tanto en la cantidad de excretas generadas en la granja como en el espacio disponible para su instalación. Tomando en cuenta estos dos aspectos se procedió a realizar el diseño para un volumen útil de 14m³ para la fase de lodos y 1.7 m³ para la cámara de biogás (Alvarado-Lassman, 2013).

Para la determinación del volumen del biodigestor se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Número de animales
- Clase de animal
- Peso promedio por vaca
- Producción de estiércol diario
- Cantidad de estiércol día por vaca
- Total de estiércol producido por 11 vacas al día
- Total de estiércol utilizable

Por estar las vacas semi estabuladas se considera que el 60% del estiércol es utilizable.

2.2.1 Factor de dilución

Para estiércol de ganado lechero se recomienda una dilución de 1:3, es decir que por cada parte de estiércol se agregan tres partes de agua.

$$VOLUMEN \text{ LÍQUIDO } VL \text{ (Efluente)} = VOLÚMEN \text{ SÓLIDO } (VS) + AGUA \text{ (3 VS)} \quad (1)$$

Por ser clima templado el tiempo de retención del efluente se estima en 30 Días.

El volumen líquido (VL) del digestor para retener el efluente durante este periodo de tiempo será de:

$$VL = VOLUMEN \text{ LÍQUIDO } \text{ DIARIO } \times \text{ TIEMPO DE RETENCIÓN} \quad (2).$$

2.3 Monitoreo del reactor de geomembrana.

2.3.1 Arranque del reactor.

Para la preparación del sustrato, lo primero que se realizó es la recolección de las excretas de las vacas, la cantidad de excretas recolectadas dependerá del tamaño de la carretilla donde se depositaran y de cuanto se quiere alimentar al reactor, una vez recolectadas estas son llevadas hasta el tanque de alimentación. Para el arranque del reactor se comenzó con una carga de 60 Kg de excretas.



Figura 2.2 Recolección de las excretas.

Una vez depositadas las excretas en el tanque de alimentación se procede a realizar la dilución tomando como base la relación (1:3), esto es por cada kilogramo de excretas, serán tres partes de agua.

Conforme se fue preparando el sustrato se le van retirando todos los residuos que no digiere la vaca como el pasto, esto para evitar que estos residuos causen alguna interferencia al momento de alimentar el reactor o en el proceso de digestión anaerobia.



Figura 2.3 Preparación del sustrato.

Una vez homogenizado las excretas con el agua, se procede a abrir la válvula de alimentación para que el sustrato pase a través del tubo de alimentación al reactor. Una vez alimentado el reactor, el tiempo de residencia fue aproximadamente de 1 mes para que el reactor empezara a producir biogás.



Figura 2.4 Alimentación al reactor.

Se arrancó el reactor arranco y empezó a funcionar con normalidad, la recolección de los residuos generados es depositada en el tanque de salida, estos residuos son un bioabono el cual puede ser utilizado como abono para las plantas y pastizales.



Figura 2.5 Tanque de salida.

2.3.2 Operación del reactor modo estable.

Para la operación del reactor en modo estable, lo primero que se realizó fue revisar las condiciones de operación, como el dueño de la granja cambio de carretilla donde se recolectan las excretas, hubo un incremento en la alimentación al reactor.

Lo primero que se realizó fue pesar la carretilla sin muestra, después realizar la recolección de las excretas, una vez recolectadas se procedió a realizar el pesaje de la carretilla con muestra, esto para conocer la nueva carga de alimentación al reactor. La alimentación al reactor de excretas fue de 90 Kg, posterior al pesaje se realizó la dilución de forma normal (1:3).



Figura 2.6 Pesaje de la muestra previo a su alimentación al reactor.

La alimentación al reactor se estandarizó en 90 Kg de excretas y esta se realizó tres veces a la semana, quedando de la siguiente forma; lunes, miércoles y viernes.



Figura 2.7. Estandarización alimentación al reactor.

El tiempo de retención de la materia orgánica para que esta pueda ser degradada es aproximadamente 30 días. Durante este tiempo el reactor debe seguir siendo alimentado para que tenga mejores rendimientos de biogás.

2.3.3 Condiciones de salida.

Para conocer las condiciones de salida se realizan las pruebas de DQO, pH, sólidos totales y sólidos volátiles (pruebas descritas anteriormente) a los residuos. El residuo generado por el reactor es utilizado como bioabono rico en nutrientes para la tierra.



Figura 2.8 Análisis de las condiciones de salida.

La recolección de biogás se realiza a través de un tubo de PVC que tiene una llave de paso, el biogás producido pasa a través de un filtro de ácido sulfhídrico, posterior al paso por el filtro, el gas sigue siendo transportado por la manguera y de este modo el biogás generado puede ser utilizado.

2.3.4 Capacidad de generación de biogás:

Contenido de sólidos totales (Kg/m^3): De forma general el estiércol fresco contiene 17 % de sólidos totales (ST), los sólidos totales representan el peso del estiércol seco, y por lo tanto es la carga real de materia sólida que alimenta al digester.

$$ST = carga\ Diaria \times 0.17/VL \quad (3)$$

Contenido de sólidos volátiles (Kg/m^3): Los sólidos volátiles (SV) representan la parte de los sólidos totales de estiércol que pasa a la fase gaseosa. De forma general equivalen al 77 % De los ST.

$$SV = ST \times 0.77 \text{ Kg/M}^3/\text{Día} \quad (4)$$

Producción de biogás ($\frac{m^3}{Kg} \text{ SV } m^3 \text{ Día}$):

Depende de la cantidad de SV que haya en la carga de estiércol diaria. Se considera que 1 Kg de SV produce 0.27M3 de Biogás (PB).

2.4 Análisis de la composición de biogás.

Para el análisis de la composición de biogás, este se realizó tomando una muestra directamente de la salida de conexión de biogás, para lo cual se coloca un recipiente lleno con agua y se conecta una manguera con la salida del biogás y se introduce en el recipiente, el biogás desplaza el agua contenida en el recipiente y así se obtiene la muestra de biogás para el analizar su composición.

La determinación se realiza a través de un Cromatógrafo de gases marca Buck Scientific Model 310. Este cromatógrafo se encuentra conectado a un equipo de cómputo el cual tiene un software del fabricante en el que muestra los porcentajes de metano, dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno presentes en la muestra.



Figura 2.9 Recolección de biogás.

Por otra parte también se analizó la producción de biogás se genera al día en el reactor de geomembrana esto a través de un medidor de flujo el cual fue colocado después del filtro por donde pasa el biogás (CH₄).

2.5 Co-digestión a nivel laboratorio.

2.5.1 Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia.

Se realizaron pruebas de biodegradabilidad anaerobia a nivel laboratorio para definir como primer punto la mejor combinación de excretas con inóculo (residuo del tanque de salida rico en bacterias, las cuales degradan la materia orgánica), esto con el objetivo de encontrar la mejor relación de alimentación para el reactor de geomembrana y así obtener la mejor producción de biogás.

Estas pruebas se realizaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL bajo condiciones mesofílicas y se adecuaron en un equipo de agitación orbital para tener una agitación constante.



Figura 2.10 Equipo agitación orbital.

2.5.2 Acondicionamiento de las muestras para las cinéticas.

Para el acondicionamiento de las excretas una vez recolectadas, se requiere pesar una porción de la excreta y adicionarle agua en una relación 1:3 esto de acuerdo a cálculos previos realizados en la dilución. Una vez realizada la dilución las excretas diluidas son caracterizadas a través de pruebas fisicoquímicas, una vez caracterizadas estas ya pueden ser utilizadas en la cinética.

El inóculo que se utilizó en las cinéticas, se obtuvo de la salida del reactor de geomembrana, el cual se encuentra localizado en una granja de ganado bovino pequeña ubicada en la colonia Barrio Nuevo de Orizaba Veracruz, una vez muestreado el inóculo éste es analizado mediante pruebas fisicoquímicas y su posterior uso en las cinéticas.

Para los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) estos se obtuvieron de la planta piloto ubicada en el Instituto Tecnológico de Orizaba, estos residuos son el resultado de la parte triturada que queda como remanente de los RSU que ya no pudieron ser alimentados al reactor. Para trabajar con estos residuos en las cinéticas de degradación anaerobia, estos son llevados al laboratorio del Instituto Tecnológico de Orizaba para su caracterización fisicoquímica, para lo cual se reduce el tamaño de partícula con una licuadora convencional con el propósito de homogenizar y estandarizar la muestra a un tamaño equivalente para todas las cinéticas y poder efectuar la dilución.

2.5.3 Biodegradabilidad anaerobia (excretas – inóculo).

La biodegradabilidad anaerobia (excretas – inóculo) consistió en evaluar la degradación de las excretas con el inóculo proveniente del reactor de geomembrana ubicado en una granja de ganado bovino ubicado en la ciudad de Orizaba, Veracruz., para conocer la mejor combinación de excretas – inóculo, en la Tabla 4 se muestra la relación en porcentaje evaluados que fue utilizado para cada cinética:

Tabla 2.2 Relación de las proporciones de la cinética de degradación (excretas – inóculo).

| No. Cinética | Excretas (%) | Inóculo (%) |
|--------------|--------------|-------------|
| 1 | 0 | 100 |
| 2 | 80 | 20 |
| 3 | 70 | 30 |
| 4 | 60 | 40 |
| 5 | 50 | 50 |

2.5.4 Biodegradabilidad anaerobia co-digestión (excretas – inóculo – RSU).

La biodegradabilidad anaerobia (excretas – inóculo - RSU) consistió en evaluar la degradación de las excretas con el inóculo y de los RSU provenientes de un mercado ubicado en la ciudad de Orizaba, Veracruz., para conocer la mejor mezcla de excretas–inóculo–RSU, en la Tabla 5 se muestra la relación en porcentaje evaluados que fue utilizado para cada cinética:

Tabla 2.3 Relación de las proporciones de la cinética de degradación co-digestion (excretas – inóculo – RSU).

| No. Cinética | Excretas (%) | Inóculo (%) | RSU (%) |
|--------------|--------------|-------------|---------|
| 6 | 50 | 40 | 10 |
| 7 | 50 | 30 | 20 |
| 8 | 50 | 25 | 25 |

Para el monitoreo de las cinéticas se realizaron diferentes pruebas fisicoquímicas que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 2.4 Parámetros analizados para la caracterización (excretas-inóculo-RSU).

| Determinación | Unidad y método |
|---------------|--|
| DQO total | mg/L |
| DQO soluble | Micrómetro Colorimétrico 5220 D Standard Methods |
| ST | g/L |
| SV | PROY-NMX-AA-034/1-SCFI-2008 |
| pH | --- Método potenciométrico 4500-H+B de Standard Methods |

El monitoreo de las cinéticas se realizó cada 24 horas durante un periodo de 10 días para la primer cinética y de 15 días para el resto de las cinéticas. El biogás generado por las cinéticas se cuantificó a través de un sistema de desplazamiento de agua en tanques de 1 L.

El monitoreo de la co-digestión de las cinéticas fue de igual modo cada 24 horas con un periodo de 20 días de duración. El biogás generado por las cinéticas se cuantificó a través de un sistema de desplazamiento de agua en tanques de 1 L.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la etapa experimental planteada en la metodología.

3.1 Caracterización de las excretas de ganado bovino.

Previo a la caracterización, las excretas bovinas son muestreadas de la granja de ganado bovino ubicado en la ciudad de Orizaba, Veracruz en el cual se encuentra el reactor de geomembrana a nivel piloto que trata las excretas producidas por el ganado. Aproximadamente se obtuvieron 300 g de excretas una vez muestreadas y 500 mL de inóculo, éstos se trasladaron hasta el laboratorio donde fueron caracterizados a través de las diferentes pruebas fisicoquímicas.



Figura 3.1. Recolección de las excretas e inóculo para caracterizar.

Debido a que las excretas son un residuo semi sólido, en el laboratorio se realizó la dilución (1:3) para poder realizar las diferentes pruebas para la caracterización. El muestreo de las excretas se realizó cada tercer día, durante el periodo de monitoreo que fue de tres meses.

En la tabla 3.1 se muestra el promedio de los resultados de la caracterización fisicoquímica a las muestras de las excretas bovinas.

Tabla 3.1 Caracterización de las excretas.

| Parámetro | Excretas |
|---------------------|-------------|
| DQO Total (g/L) | 6.39 ± 0.5 |
| DQO Soluble (g/L) | 2.59 ± 0.5 |
| ST (g/L) | 4.67 ± 0.5 |
| SV (g/L) | 2.90 ± 0.5 |
| pH | 7.84 ± 0.3 |
| Carbohidratos (g/L) | 21.70 ± 0.3 |

3.2 Control de las condiciones de alimentación.

Para el control de las condiciones de alimentación se realizó en base a cálculos matemáticos cual es el porcentaje de estiércol utilizable de todas las vacas que se encuentran en la granja.

Determinación del volumen del biodigestor:

Número de animales: 11

Clase de animal: Vacas lecheras

Peso promedio por vaca: 300 Kg.

Producción de estiércol Diario: 8 Kg/ Vaca/ Día por cada 100 Kg De peso.

Cantidad de estiércol día por vaca:

$$= 8Kg/100Kg \times 300Kg/vaca = 24 Kg/vaca /Día$$

Total de estiércol producido por 11 vacas al día:

$$= 11 \text{ VACAS} \times 24 \text{ Kg/vaca/ Día} = 264 \text{ Kg /Día.}$$

Total de estiércol utilizable:

Por estar las vacas semi estabuladas se considera que el 60% del estiércol es utilizable.

$$264 \text{ Kg/día} \times 60\% = 158.4 \text{ Kg/día de estiércol utilizable.}$$

Dilución:

Para estiércol de ganado lechero se recomienda una dilución de 1:3, es decir que por cada parte de estiércol se agregan tres partes de agua.

El total de estiércol utilizable equivale a 158.4 L/día

$$\text{VOLÚMEN LÍQUIDO VL (Efluente)} = \text{VOLÚMEN SÓLIDO (VS)} + \text{AGUA (3 VS)}$$

$$VL = \frac{158.4 \text{ L}}{\text{Día}} + 3 \left(\frac{158.4 \text{ L}}{\text{Día}} \right) = 158.4 \frac{\text{L}}{\text{Día}} + 475.2 \frac{\text{L}}{\text{Día}} = 633.6 \frac{\text{L}}{\text{Día}}$$

Por ser clima templado el tiempo de retención del efluente se estima en 30 Días.

Por estar las vacas semi estabuladas se considera que el 60% del estiércol es utilizable.

3.3 Monitoreo del reactor de geomembrana.

Se realizó un monitoreo del reactor de geomembrana durante un periodo de 3 meses, el reactor fue operado en modo estable, esto es alimentando el reactor constantemente, con la misma carga de alimentación y conservando el volumen de dilución.

La alimentación al reactor fue realizada cada tercer día, siguiendo los pasos descritos en la metodología, la recolección de las muestras de entrada y salida se realizó cada vez que se alimentaba, para la toma de muestra del centro del reactor se realizó una vez por semana.

En la figura 3.2, se muestra el esquema del digestor anaerobio el cual fue monitoreado, el tanque de alimentación que es la entrada al reactor, la parte del centro donde se recolecta el biogás y el tanque de salida donde se deposita la materia degradada (bioabono).

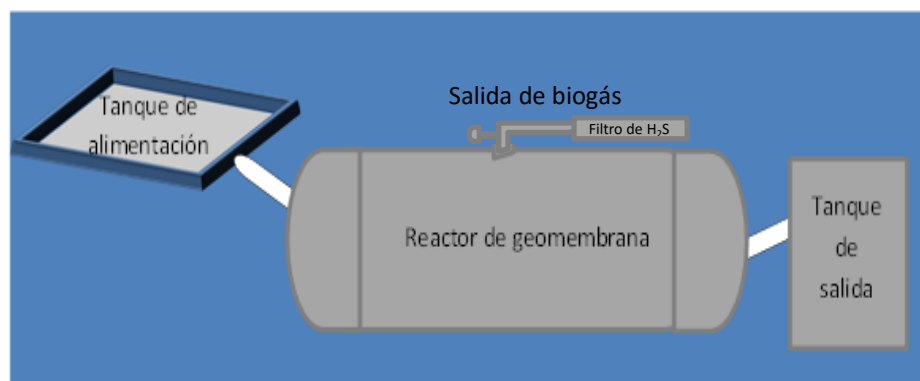


Figura 3.2 Esquema completo de la planta de biogás.

3.3.1 Operación en modo estable.

3.3.1.1 Medición de pH.

Uno de los parámetros que indican de manera inmediata el funcionamiento del digestor es el pH. Para el correcto funcionamiento de la digestión anaerobia es necesario un pH neutro, en la Figura 3.3 se observa el monitoreo diario del pH durante los días de inoculación, el lote de arranque y los lotes de estabilización.

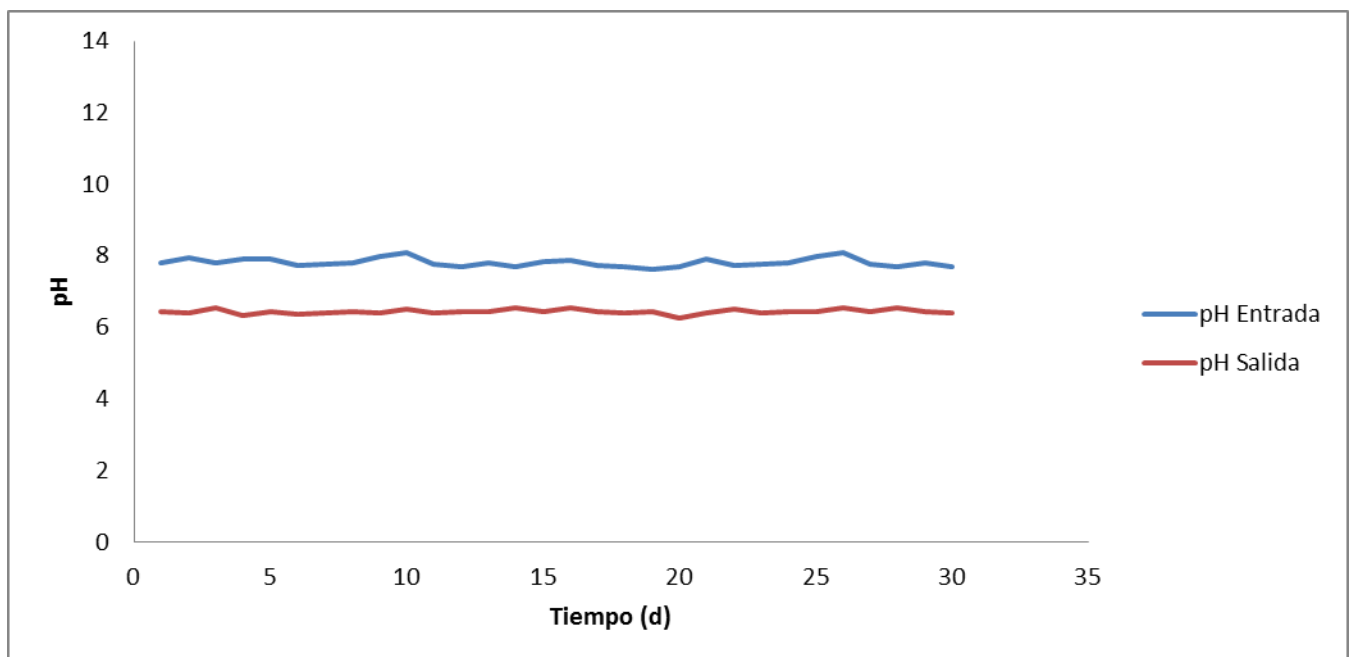


Figura 3.3 Valores de pH.

Como se puede observar en la Figura 3.3, el pH se mantuvo en un rango de neutralidad, iniciando cada lote con un pH ligeramente elevado, es decir que las excretas bovinas representan un sustrato adecuado para la digestión anaerobia ya que en todas las proporciones utilizadas se mantuvo un pH cercano a la neutralidad.

Omar R. et al., 2008 realizaron un estudio en Malasia en un digestor anaerobio de 10 L presentando en su experimento un valor de pH de 6.96, de acuerdo a su estudio para controlar el pH y tenerlo cercano a neutro HCL y NaOH 1N, los resultados obtenidos en este trabajo muestran una diferencia significativa en el valor de pH reportado esto se pudo deber a que las condiciones del medio fueron diferentes debido a que este trabajo se realizó bajo condiciones normales de temperatura reportando un pH de 7.96, para este trabajo no fue necesario realizar un ajuste en el pH debido a que como se encuentra cercano a la neutralidad no influyó en el proceso de digestión anaerobia.

3.3.1.2 Temperatura.

Como el reactor se encuentra enterrado en la tierra, se realizó un monitoreo de la temperatura, esto con el fin de llevar un control. También se monitoreó la temperatura a la entrada (alimentación de las excretas diluidas) y a la salida del reactor.

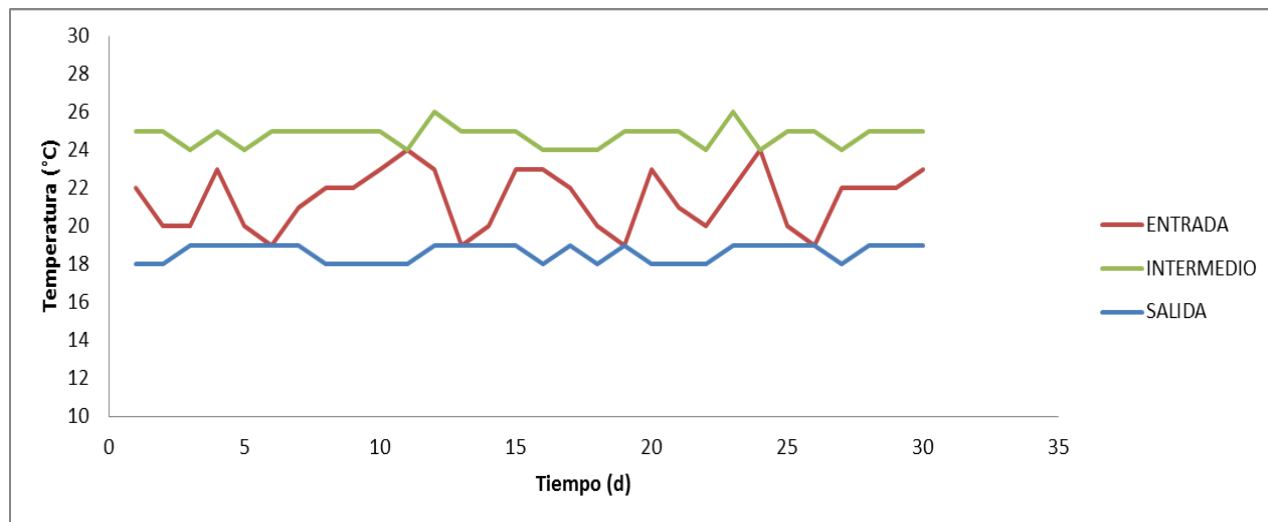


Figura 3.4 Temperatura.

En la figura 3.4 se puede observar que la temperatura se mantuvo en un rango constante, a pesar de ser clima templado, la zona donde se localiza el reactor de geomembrana no hubo variaciones.

Omar R. et al., 2008 realizaron un estudio en un reactor anaerobio de 10 L reportando en su estudio una temperatura termofílica de 53°C esto con el objetivo de acondicionar las bacterias al medio y se obtuviera una rápida producción de biogás, los resultados obtenidos para este trabajo se puede observar que se realizó a condiciones normal de temperatura 18 a 25°C esto debido a que el reactor de geomembrana se encuentra expuesto al aire libre, de igual modo el proceso de digestión anaerobia no se vio afectado por las condiciones climáticas y se mantuvo una temperatura estable.

3.3.2 Condiciones de entrada y salida.

La determinación de la Demanda Química de Oxígeno total y soluble (DQO_T Y DQO_S), se realizó a las muestras de entrada y salida cada tercer día, en la figura 16 se muestra la degradación de la materia de forma gradual.

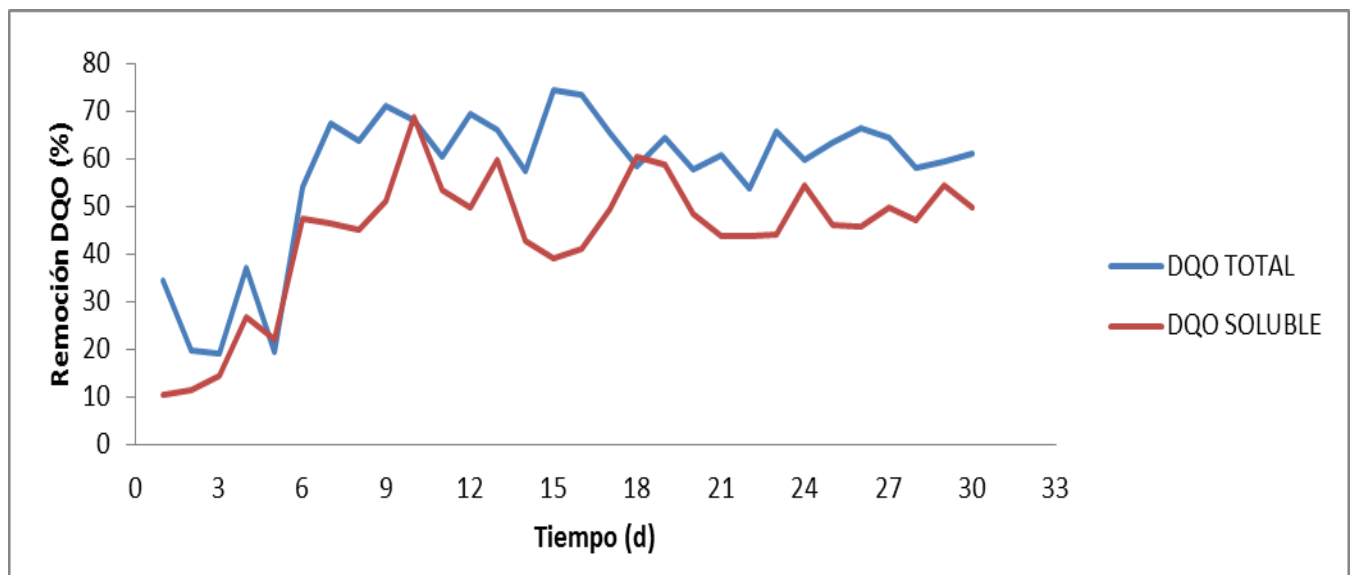


Figura 3.5 Porcentaje de remoción DQO_T y DQO_S .

Como se puede observar en la figura 3.5, la remoción de materia orgánica se va dando a medida que fueron transcurriendo los días de operación y monitoreo del reactor.

Omar R. et al., 2008 realizaron un estudio en un reactor anaerobio de 10 L reportando en su estudio una DQO de 42.5 g/L sin dilución, alcanzando una remoción del 51%. Los resultados presentados en este trabajo presentan un DQO de 6.39 g/L con una dilución (1:3) alcanzando una remoción del 57%.

En la figura 3.6 se muestra el monitoreo de los Sólidos Totales (ST) y los Sólidos volátiles (SV), los cuales igual fueron realizados al igual que los otros análisis cada tercer día.

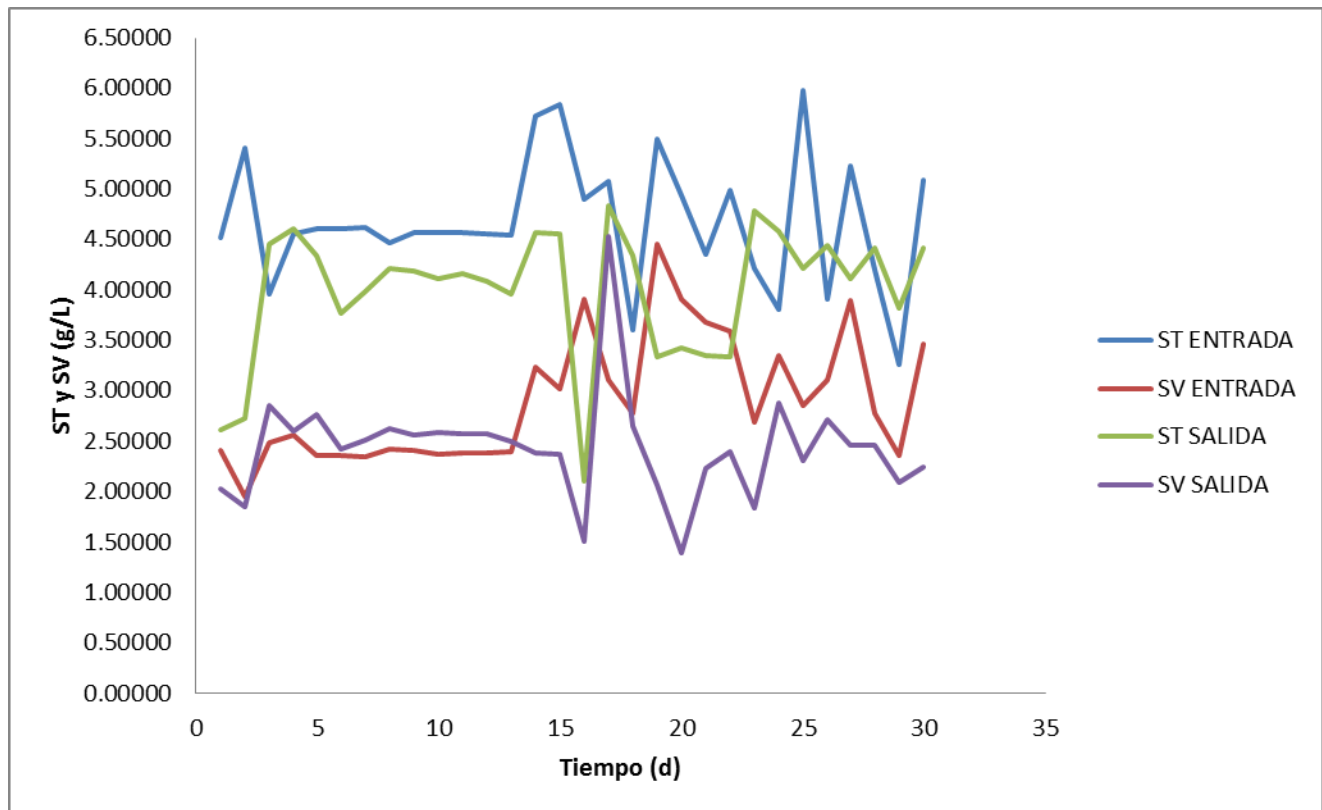


Figura 3.6 Porcentaje de remoción de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV).

Los sólidos contenidos en el digester anaerobio también son un parámetro que nos indica cómo va transcurriendo la remoción gradual de la materia orgánica durante el proceso de digestión anaerobia.

Omar R. et al., 2008 realizaron un estudio en un reactor anaerobio de 10 L presenta en su estudio resultados de sólidos volátiles (SV) de 1 187.9 mg/L. Los resultados presentados en este trabajo de las excretas alimentadas al digester presentaron en promedio un cantidad de Sólidos Totales (ST) de 4.67 g/L y un contenido promedio de Sólidos Volátiles (SV) de 2.90 g/L, como se puede observar se presenta una similitud en sólidos volátiles para ambos estudios se realizaron diluciones para poder trabajar las muestras de excretas.

3.3.2 Capacidad de generación de biogás.

Para conocer la capacidad de generación de biogás previo al monitoreo con el medidor de flujo, se realizó mediante cálculos matemáticos un aproximado de la capacidad de generación de biogás del reactor de geomembrana. El contenido de sólidos totales (Kg/m^3): De forma general el estiércol fresco contiene 17 % de sólidos totales (ST), los sólidos totales representan el peso del estiércol seco, y por lo tanto es la carga real de materia sólida que alimenta al digester.

$$ST = carga\ Diaria \times 0.17/VL$$

Contenido de sólidos volátiles (Kg/m^3): Los sólidos volátiles (SV) representan la parte de los sólidos totales de estiércol que pasa a la fase gaseosa. De forma general equivalen al 77 % de los ST.

$$SV = ST \times 0.77\ Kg/M3/ Día$$

Producción de biogás ($\frac{m^3}{Kg} SV m^3 Dia$): Depende de la cantidad de SV que haya en la carga de estiércol diaria. Se considera que 1 Kg de SV produce $0.27M^3$ de Biogás (PB)

Producción de biogás al día (PB/DIA) = $0.27 m^3 * SV * VL$

$$ST = CARGA DIARIA X 0.17 / VL$$

$$ST = 158.4 Kg / Día. X 0.17 / 19.0 M3 = 1.41 Kg/M3 / Día.$$

$$SV = ST X 0.77 = 1.41 Kg/m^3 / Día X 0.77 = 1.08 Kg/m^3 / Día$$

3.4 Análisis de la composición de biogás.

Para la medición de la producción de biogás este fue cuantificado cada tercer día y en la figura 3.7 se puede observar cómo se comporta, este fue monitoreado cada tercer día comenzando en el mes de febrero y terminando en la primera semana de abril.

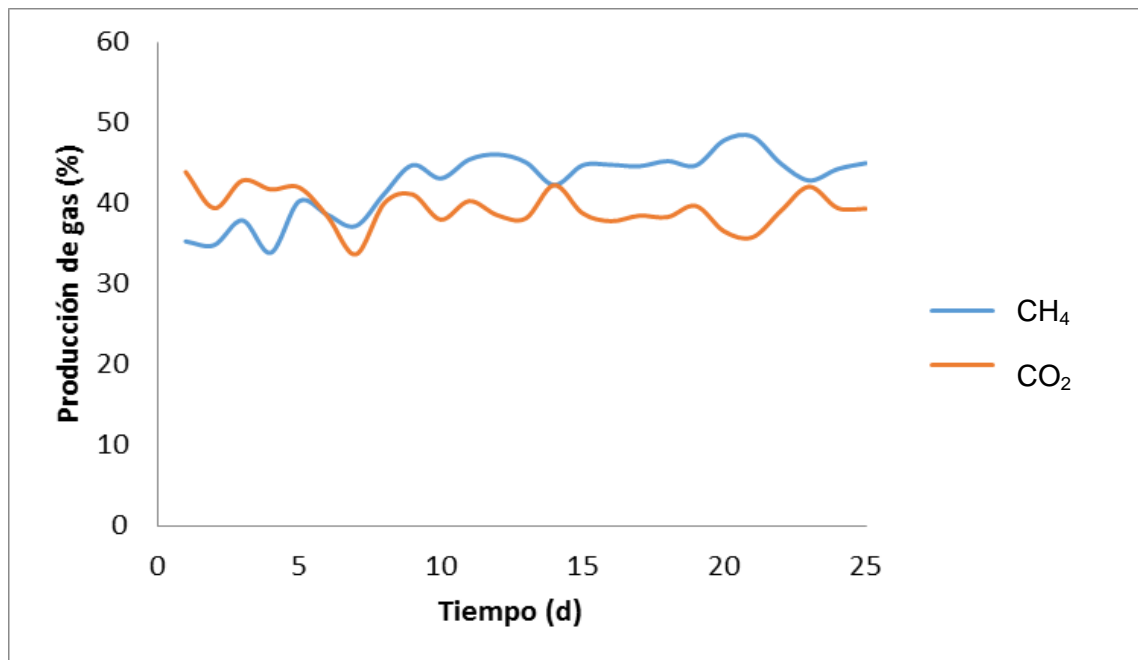


Figura 3.7 Producción de biogás.

En la Figura 3.7 se muestra que la producción de biogás fue continua, el monitoreo fue cada tercer día y se puede observar que desde que se comenzó a monitorear la producción de biogás se mantuvo constante.

Omar R. et al., 2008 realizaron un estudio en un reactor anaerobio de 10 L y presenta en su estudio resultados de la composición de metano (CH_4) de 68% y de dióxido de carbono (CO_2) de 19%. Los resultados presentados en este trabajo muestran una composición de CH_4 de 43% y una composición en menor proporción de CO_2 con 39%. Como se puede observar hay una diferencia significativa en ambos casos esto se pudo deber a que en el monitoreo de biogás del reactor de geomembrana se efectuó la medición de biogás directamente de la salida de la primer válvula de biogás antes de pasar por el filtro de ácido sulfhídrico y esta pudo contaminarse con el aire del medio ambiente y elevar la composición del CO_2 y por lo tanto afectar de manera directa la composición de CH_4 .

3.4.1 Gestión del biogás producido para su aprovechamiento.

La gestión del biogás producido por el reactor de geomembrana es a través de una conexión de gas la cual se localiza después del filtro de ácido sulfhídrico y que conecta con una parrilla de tres quemadores.



Figura 3.8 Conexión de biogás y parrilla.

En la figura 3.9 se pueden observar los dos usos que se le dan al biogás generado en el reactor de geomembrana el cual logra alcanzar una temperatura la cual oscila entre 70 y 75°C, esta temperatura es lo suficientemente necesaria para pasteurizar la leche, además también se utiliza este biogás en el proceso de elaboración de queso artesanal mismo que es fabricado en la granja.



Figura 3.9 Productos obtenidos a partir del aprovechamiento del biogás.

3.5 Co-digestion.

3.5.1 Biódegradabilidad anaerobia (excretas – inóculo).

Se realizó el estudio de la biodegradabilidad anaerobia para lo cual se realizó un muestreo de la salida del reactor de geomembrana para obtener el inóculo, las excretas se muestrearon del tanque de alimentación previo a la dilución.

3.5.1.1 Caracterización de las excretas e inóculo.

En la figura 3.10 se observan las muestras recolectadas de inóculo y de las excretas previas a su caracterización.



Figura 3.10 Muestras de excretas e inóculo.

Una vez recolectadas las muestras se trasladaron al laboratorio del Instituto Tecnológico de Orizaba para realizar su caracterización, previo a ello las excretas fueron pesadas y diluidas.



Figura 3.11 Preparación de las excretas para las cinéticas.

En la figura 3.11 podemos observar la preparación de la excretas, una vez muestreadas tanto para la caracterización se tuvo que acondicionar la muestra para replicar las condiciones como se alimenta al reactor de geomembrana, por lo tanto se pesó la muestra y se ocupó la misma dilución (1:3) y se homogenizó la muestra.

Para el caso del inóculo como es un residuo semisólido, una vez muestreado de la salida del reactor de geomembrana, este se caracterizó directamente y posterior a la caracterización se realizó la homogenización con las excretas bovinas para poder montar las diferentes cinéticas.

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica inicial a las excretas bovinas e inóculo, estos resultados sirvieron para establecer las relaciones excreta – inóculo que se plantearon al inicio de este trabajo.

Tabla 3.2 Caracterización de las excretas e inóculo para las cinéticas.

| Parámetro | Excretas | Inóculo |
|-------------------|----------|---------|
| DQO Total (g/L) | 11.53 | 10.12 |
| DQO Soluble (g/L) | 4.48 | 3.77 |
| ST (g/L) | 14.17 | 11.73 |
| SV (g/L) | 10.33 | 10.14 |
| pH | 8.00 | 7.86 |

Debido a que la DQO y sólidos en sus dos formas presentan mayores concentraciones en las excretas, así se pudo dosificar la carga orgánica de las cinéticas de biodegradabilidad.

La Tabla 3.3 muestra la relación sustrato-inóculo empleada para el montaje de las cinéticas en las proporciones utilizadas para conocer la biodegradabilidad de las excretas, estas pruebas se realizaron por duplicado.

Tabla 3.3 Relación sustrato-inóculo.

| Cinética | Excretas (%) | Inóculo (%) |
|----------|--------------|-------------|
| 1 | 0 | 100 |
| 2 | 80 | 20 |
| 3 | 70 | 30 |
| 4 | 60 | 40 |
| 5 | 50 | 50 |

En cada una de las cinco cinéticas montadas el volumen útil para cada reactor fue de 250 mL, con un espacio para la cámara de biogás de 60 mL.

3.5.1.2 DQO total y soluble (% de remoción).

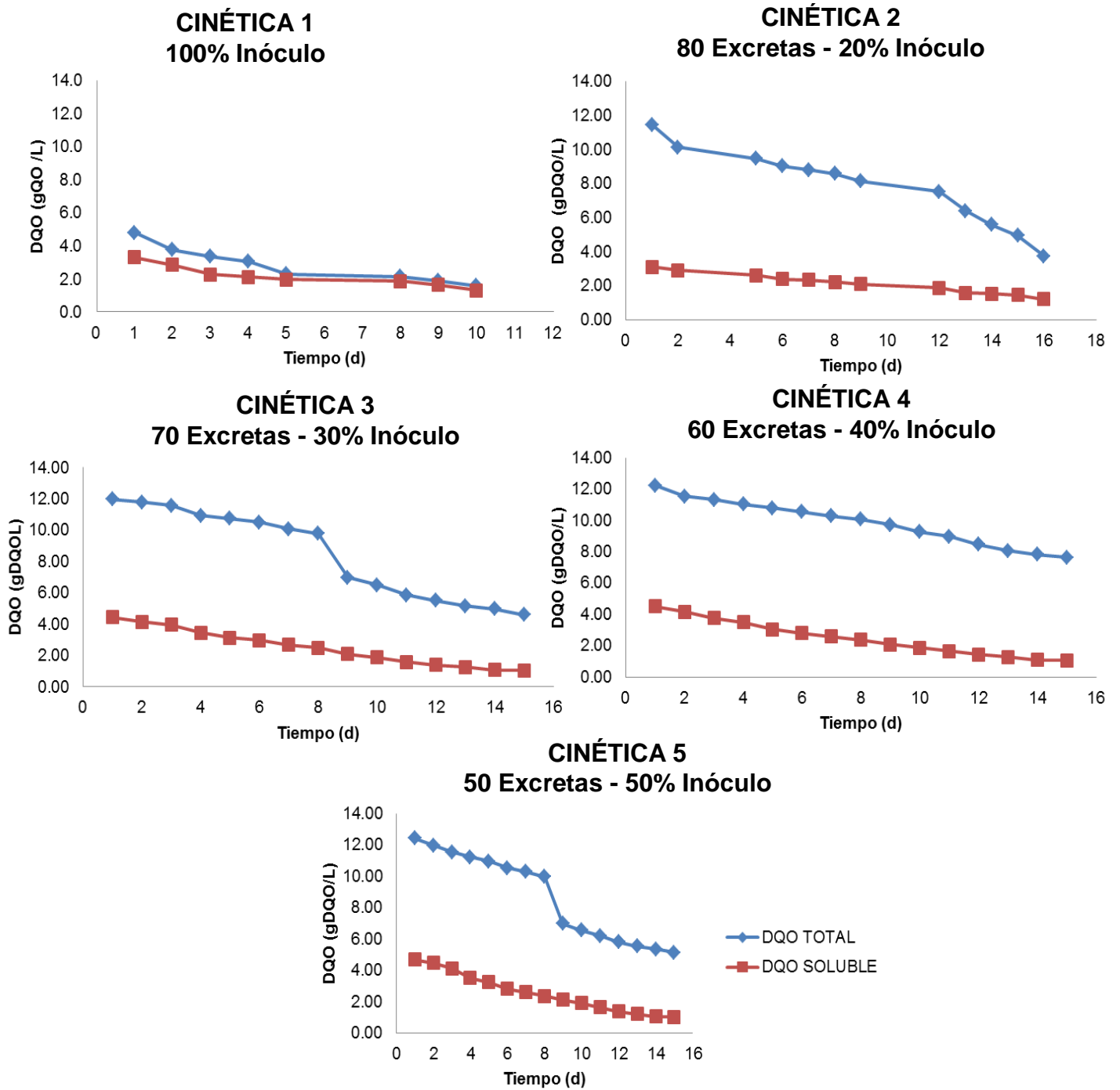


Figura 3.12 Remoción con base a la DQO.

En la Figura 3.12 se presentan los resultados de los comportamientos de las cinco cinéticas respecto a la remoción con base en la DQO_{total} y $DQO_{soluble}$. Como se puede observar en la cinética 1 solo logró alcanzar una remoción del 54%. Para la cinética 2 la remoción de la materia orgánica se mantuvo cercana al comportamiento de la anterior con una remoción del 53%.

Tanto en la cinética 1 y 2 podemos observar que hubo una baja remoción, esto se pudo deber a que hubo un pH bajo y las cinéticas se vieron afectadas. Para la cinética 3 la degradación de la materia tuvo un aumento significativo con respecto a la anterior, obteniendo una remoción del 76% de la materia orgánica en un periodo de 12 días. Para la cinética 4, el comportamiento fue muy similar al de la cinética 3, teniendo el mismo porcentaje de remoción de la materia. Para la cinética 5 y última alcanzó una remoción de la materia orgánica del 78%, superando a todas las anteriores cinéticas, pero su producción de biogás fue menor en comparación a la cinética 3 y 4. En las últimas tres cinéticas podemos ver que su remoción se incrementó significativamente esto se pudo deber al aumento de pH lo cual favoreció el proceso de degradación de las cinéticas.

Rico, 2011 realizó un estudio en una planta piloto con la fracción líquida de las excretas bovinas alcanzando una remoción con base a su DQO de 70% de materia removida. Los resultados que se obtuvieron en este trabajo contrastan o son similares a los presentados por Rico en 2011, éste se puede deber a que las excretas bovinas son un sustrato adaptable a las condiciones del medio que se le presenten.

3.5.1.3 Sólidos Totales y Sólidos Volátiles (% de remoción).

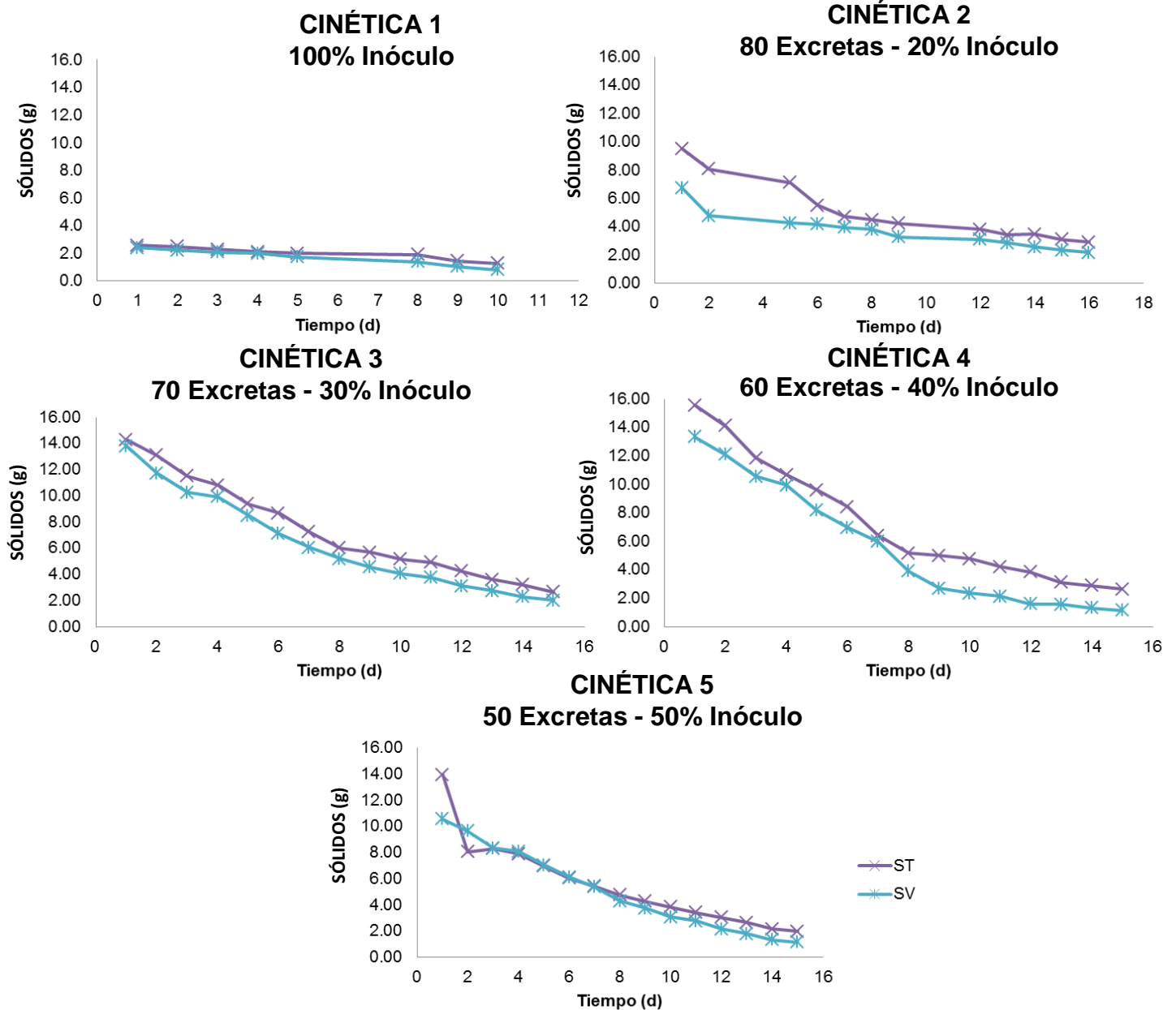


Figura 3.13 Remoción con base a los sólidos totales y volátiles.

Los sólidos también son un buen parámetro indicativo del comportamiento de la remoción de la materia orgánica. En la Figura 3.13 podemos observar que en la cinética número 1, la remoción de sólidos totales y volátiles fue mínima teniendo una

degradación de materia orgánica lenta obteniendo una remoción del 49 y 64% respectivamente. En cuanto a la cinética 2, se puede observar un mejor comportamiento de degradación de materia en forma gradual y mejorando a la cinética 1, esta logró una remoción de SST=67% y SSV=65%, como se puede observar de igual modo que en la DQO, la remoción de sólidos de las dos primeras cinéticas fue muy similar en sólidos volátiles esto por las condiciones del medio como el pH.

Para el caso de la cinética 3, esta tuvo un resultado satisfactorio debido a que se logró alcanzar una remoción para ST del 81% y de SV del 85% mostrando así un buen comportamiento y una buena producción de biogás. En la cinética número 4 de igual modo que la cinética número 3 dio resultados positivos en la experimentación alcanzando valores de remoción de ST=82% y SV=91% también obtuvo una buena producción de biogás. Para la cinética 5 la degradación de la materia tuvo buenos resultados obteniendo valores para ST del 85% y para SV del 89%.

Como se puede observar en las últimas tres cinéticas el incremento en la remoción fue significativo alcanzando valores entre 80 y 90% de la degradación, con respecto a las primeras dos cinéticas que sus valores estuvieron por debajo del 70%, esto se pudo deber a la influencia del pH sobre las muestras que estuvo por arriba del neutro y favoreció el proceso de degradación.

Yin, 2014 presentó un estudio sobre la digestión anaerobia de la mezcla de excretas de ganado porcino y bovino, las cuales se realizaron en reactores de 1 L teniendo remoción de sólidos totales del 41.5% y de sólidos volátiles del 78.9%. Los resultados de sólidos obtenidos en este trabajo difieren de los presentados por Yin en 2014 debido a que la mejor remoción alcanzada fue en la cinética 4, con valores entre 80 y 90% en sólidos totales y volátiles respectivamente, seguida de la cinética 3 que sus valores fueron entre 80 y 85%, esto se pudo deber a la condición del pH que tuvo influencia en el proceso de degradación.

3.5.1.4 Comportamiento del pH.

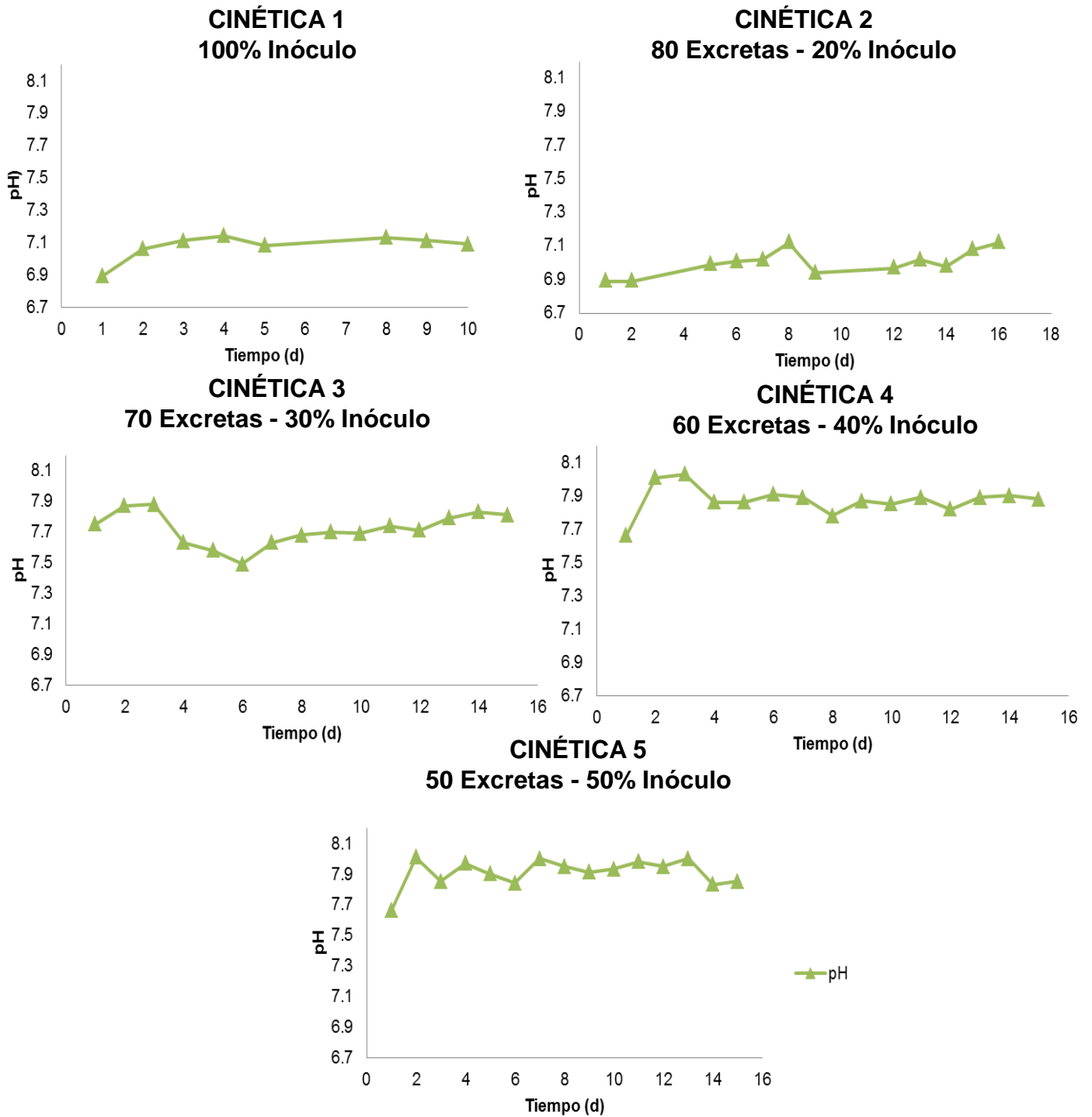


Figura 3.14 Comportamiento del pH en las cinéticas.

Uno de los parámetros que indican de manera inmediata como es el comportamiento de un reactor es el pH. Para el correcto funcionamiento de la digestión anaerobia es necesario un pH neutro o cercano a él, en la Figura 3.14 podemos observar el comportamiento del monitoreo diario de las cinco cinéticas con base al parámetro de pH, en la cinética 1, se puede observar que el pH oscila entre valores de 6.9 y 7.1. Para la cinética número 2 se puede observar que tuvo valores similares a la primer cinética, a pesar de que son valores cercanos a un pH neutro no favoreciendo mucho a la digestión anaerobia esto se puede reflejar en la producción de biogás.

En la cinética 3, podemos observar que el pH se incrementó considerablemente con respecto a las primeras dos cinéticas, los valores de esta cinética se encontraron entre 7.5 y 7.9. Para la cinética número 4 los valores obtenidos oscilaron entre 7.8 y 8.0. Por último en la cinética 5 los valores se fueron similares a la cinética 4 los cuales estuvieron entre 7.8 y 8.0. Analizando el comportamiento del pH podemos decir que las primeras dos cinéticas su pH estuvo por debajo del neutro, esto se pudo deber a que la concentración del inóculo y su pH influyeron directamente en el proceso de degradación de las cinéticas, por otra parte las cinéticas 3, 4 y 5 se vieron favorecidas con un pH de entre 7.5 y 8, esto favoreció el proceso de digestión, la remoción de la materia y la producción de biogás.

Yin, 2014 realizó un estudio en diferentes reactores de 1 L una mezcla de excretas porcinas y bovinas, presentando en sus experimento un pH que oscila entre 6.4 y 7, en condiciones mesofílicas con una temperatura de 35° C, los resultados obtenidos en este trabajo muestran una diferencia significativa en los valores de pH en las cinéticas 3, 4 y 5, con un pH promedio de 7.83 como resultado podemos observar que las excretas bovinas tienen un pH cercano a la neutralidad el cual no influyó en la degradación de la materia y el proceso de digestión anaerobia, además de que la producción del biogás tampoco se vio afectada.

3.5.1.4 Producción diaria y acumulada de biogás.

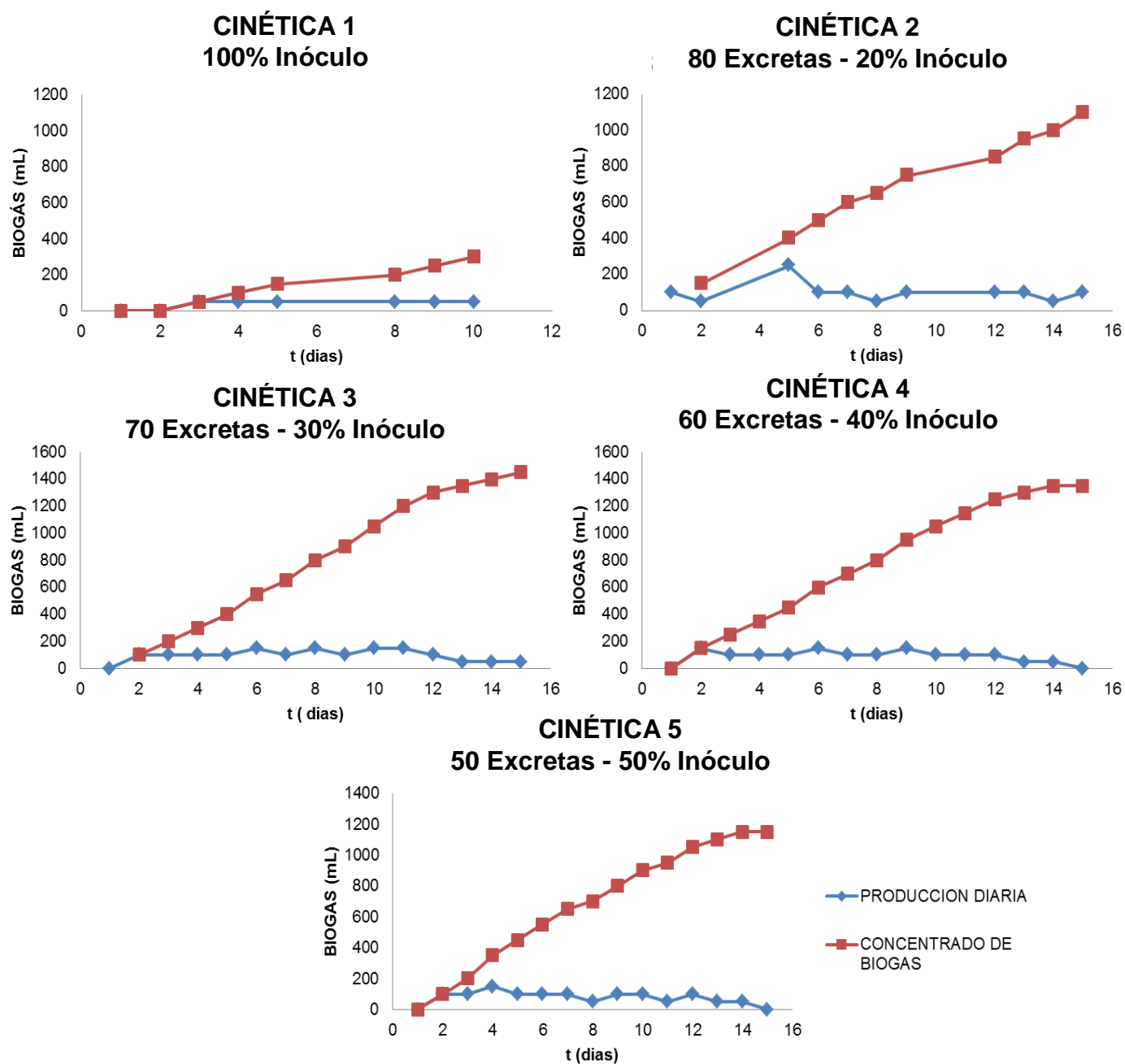


Figura 3.15 Monitoreo de la producción diaria y acumulada de biogás.

En la Figura 3.15 se muestran los resultados de la producción diaria y del concentrado de biogás durante todo el periodo de monitoreo de las cinéticas. Para la

cinética 1, se puede observar una tendencia lineal y baja producción de biogás obteniendo apenas 50 mL diarios de biogás. En la cinética 2 hubo una mayor producción teniendo valores entre 100 y 250 mL de biogás, (el pico de 250 mL fue debido a que se monitoreó al tercer día con respecto de la medición anterior), como se puede observar en las dos primeras cinéticas hubo una diferencia considerable en la producción de biogás, tratando únicamente el inóculo y la mezcla excretas-inóculo.

Para la cinética número 3 podemos observar que la producción fue medianamente uniforme obteniendo un volumen entre 100 y 150 mL de biogás diarios. Para la cinética 4 se puede observar al igual que en la cinética anterior valores similares y una tendencia uniforme de metano obtenido. En la cinética 5 se obtuvieron valores entre 50 y 100 mL teniendo una tendencia poco variable. Analizado el comportamiento de la producción de biogás podemos observar que la mejor respuesta se tuvo realizando la mezcla excretas-inóculo y que la cinética 3 con una relación 70-30 respectivamente fue la que mostro mejores resultados, logrando obtener un concentrado de biogás de 1450 mL.

Yin, 2014 presentó un estudio realizado en reactores de 1 L y obtuvo un volumen de 4600 mL en el día 15, haciendo una relación con reactores de 250 mL la producción de biogás sería de 1100 mL. Los resultados obtenidos en el presente trabajo son similares a los presentados por Yin, en 2014 pero con la diferencia que en condiciones de pH por arriba del neutro favorece un mejor comportamiento de las excretas y una mayor producción de biogás como la obtenida en la cinética la cual obtuvo un valor de 1300 mL de biogás producidos al concluir la cinética.

Nota. En cada una de las cinéticas se presentan valores de cero en producción de biogás, esto debido a que la cinética fue analizada desde el primer día que se montó y por lo tanto en este primer día no hubo producción de biogás, si no 24 horas después.

3.5.2 Biodegradabilidad anaerobia co-digestión (excretas – inóculo – RSU).

Los residuos sólidos urbanos utilizados para conocer la biodegradabilidad anaerobia de la co-digestión son la fracción semisólida que ya no se utilizó para alimentar un reactor anaerobio ubicado en la planta piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba, como se puede observar en la figura 3.16 los residuos de una apariencia semisólida, estos son llevados al laboratorio del instituto para su acondicionamiento y posteriormente para su caracterización.



Figura 3.16 Fracción semisólida de los residuos sólidos urbanos.

Nota. Para el caso de las excretas bovinas y el inóculo estos son muestreados en la granja y se sigue el mismo procedimiento descrito utilizado solo para el montaje de las cinéticas excretas – inóculo.

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica inicial a las excretas bovinas, inóculo y RSU, estos resultados sirvieron para establecer las relaciones excreta–inóculo–RSU que se plantearon para este trabajo.

Tabla 3.4 Caracterización de las excretas, inóculo y RSU para la co-digestión.

| Parámetro | Excretas | Inóculo | RSU |
|-------------------|----------|---------|-------|
| DQO Total (g/L) | 13.67 | 9.38 | 30.50 |
| DQO Soluble (g/L) | 5.64 | 5.17 | 14.64 |
| ST (g/L) | 14.19 | 13.17 | 15.10 |
| SV (g/L) | 13.32 | 11.94 | 14.87 |
| pH | 7.67 | 6.73 | 4.06 |

Debido a que la DQO y sólidos en sus dos formas presentan mayores concentraciones en las excretas, así se pudo dosificar la carga orgánica de las cinéticas de biodegradabilidad.

La Tabla 3.5 muestra la relación sustrato-inóculo-RSU empleada para el montaje de las cinéticas en las proporciones utilizadas para conocer la biodegradabilidad de las excretas, estas pruebas se realizaron por duplicado.

Tabla 3.5 Relación sustrato-inóculo-RSU.

| No. Cinética | Excretas (%) | Inóculo (%) | RSU (%) |
|--------------|--------------|-------------|---------|
| 1 | 50 | 40 | 10 |
| 2 | 50 | 30 | 20 |
| 3 | 50 | 25 | 25 |

En cada una de las cinco cinéticas montadas el volumen útil para cada reactor fue de 250 mL, con un espacio para la cámara de biogás de 60 mL.

3.5.2.1 DQO total y soluble co-digestión (% de remoción).

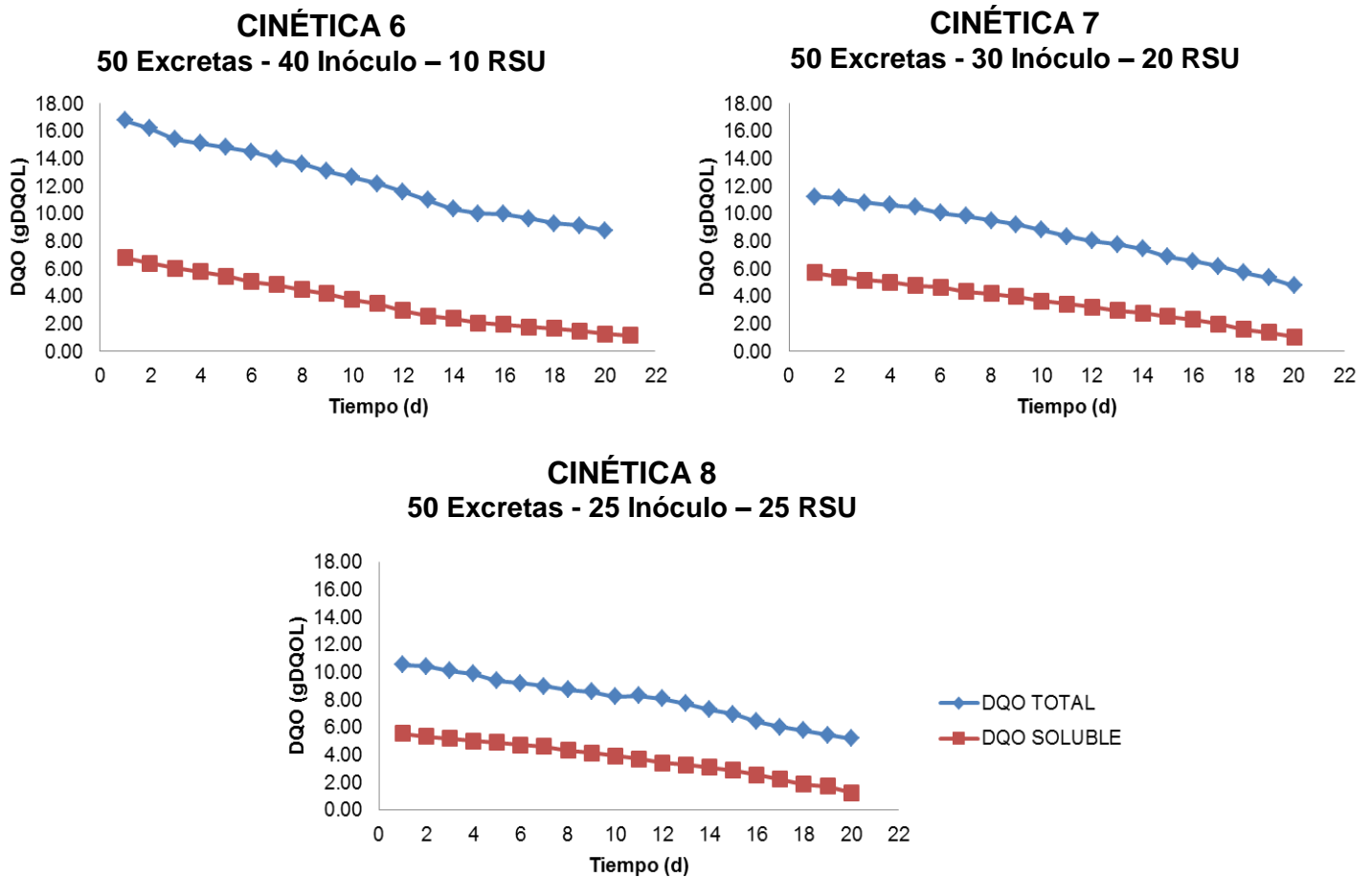


Figura 3.17 Remoción con base a su DQO de la co-digestión.

En la Figura 3.17 se presentan los resultados del comportamiento de la co-digestión para las tres cinéticas respecto a la remoción con base en la DQO_{total} y $DQO_{soluble}$. Como se puede observar en la cinética 6 logró una remoción de 81% teniendo una degradación final de 5510 mg/L. Para la cinética 7 tienen una tendencia similar a la anterior cinética esto se corrobora con la remoción que tuvo del 81% con una degradación final de la materia orgánica de 4660 mg/L. Para la cinética 8 la remoción disminuyó significativamente alcanzando una remoción del 76% y una degradación de 4280 mg/L, el monitoreo para las tres cinéticas fue de 20 días.

Macías-Corral, 2008 realizó un estudio en un reactor con un volumen aproximado de 6L utilizando las excretas bovinas y la fracción líquida de los residuos sólidos urbanos alcanzando una degradación final de 5000 mg/L con base a su DQO. Los resultados que se obtuvieron en este trabajo contrastan o son similares a los presentados por Macías-Corral en 2008, por lo tanto se puede decir a que al realizar la co-digestión de las excretas bovinas con los RSU se convierten en un sustrato adaptable a las condiciones del medio para el proceso de digestión anaerobia.

3.5.2.2 Sólidos Totales y Sólidos Volátiles co-digestión (% de remoción).

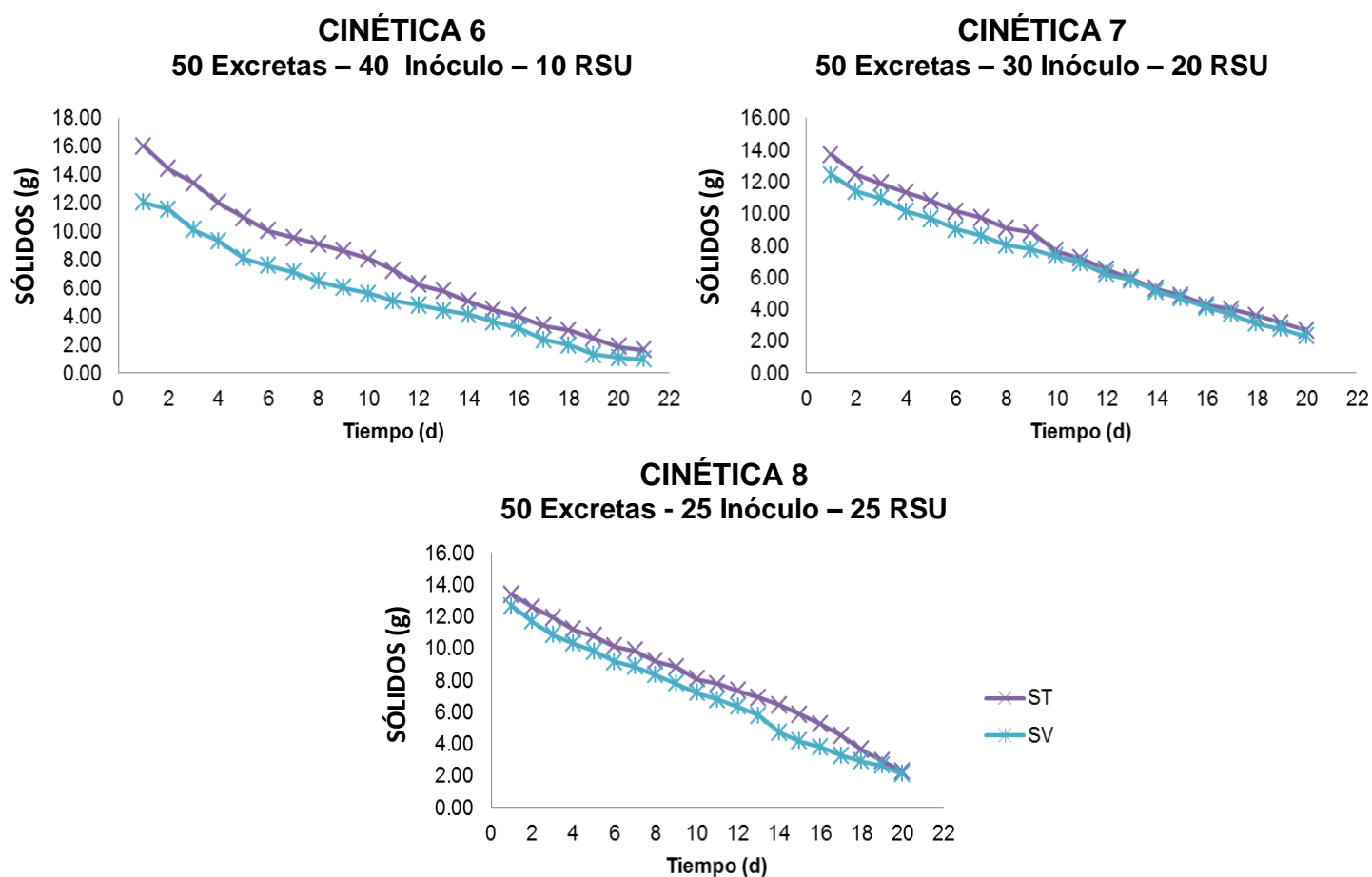


Figura 3.18 Remoción con base a los Solidos Totales y Volátiles de la co-digestión.

Los sólidos también son un parámetro indicativo del comportamiento de la remoción de la materia orgánica. En la Figura 3.18 podemos observar que en la cinética 6, se tuvo una remoción de sólidos totales de 88% y de sólidos volátiles de 91%. En cuanto a la cinética 7, se puede observar que la remoción de ST es de 80% y de SV es de 81%. Para el caso de la cinética 8, el porcentaje de remoción tanto para ST como para SV fue de 83%.

Para los tres casos se puede observar que la remoción estuvo por encima del 80% en el caso de la cinética 6 se observa que la remoción fue más alta esto debido a que la concentración inicial de ST y SV es más altas con respecto a las otras dos cinéticas, pero si se ajustan los datos experimentales teniendo las mismas concentraciones para que las tres cinéticas la remoción de la cinética 6 es de ST=70% y SV=75%.

Macías-Corral, 2008 presentó un estudio sobre la digestión anaerobia de la mezcla de excretas de ganado bovino con RSU, las cuales se realizaron en un reactor de 6 L teniendo remoción de sólidos totales del 82% y de sólidos volátiles del 89%. Los resultados de sólidos obtenidos en este trabajo son muy similares a los presentados por *Macías-Corral* en 2008 que para ambos estudios los valores tanto de sólidos totales como de sólidos volátiles oscila entre 80 y 90%.

3.5.2.3 Comportamiento del pH co-digestión.

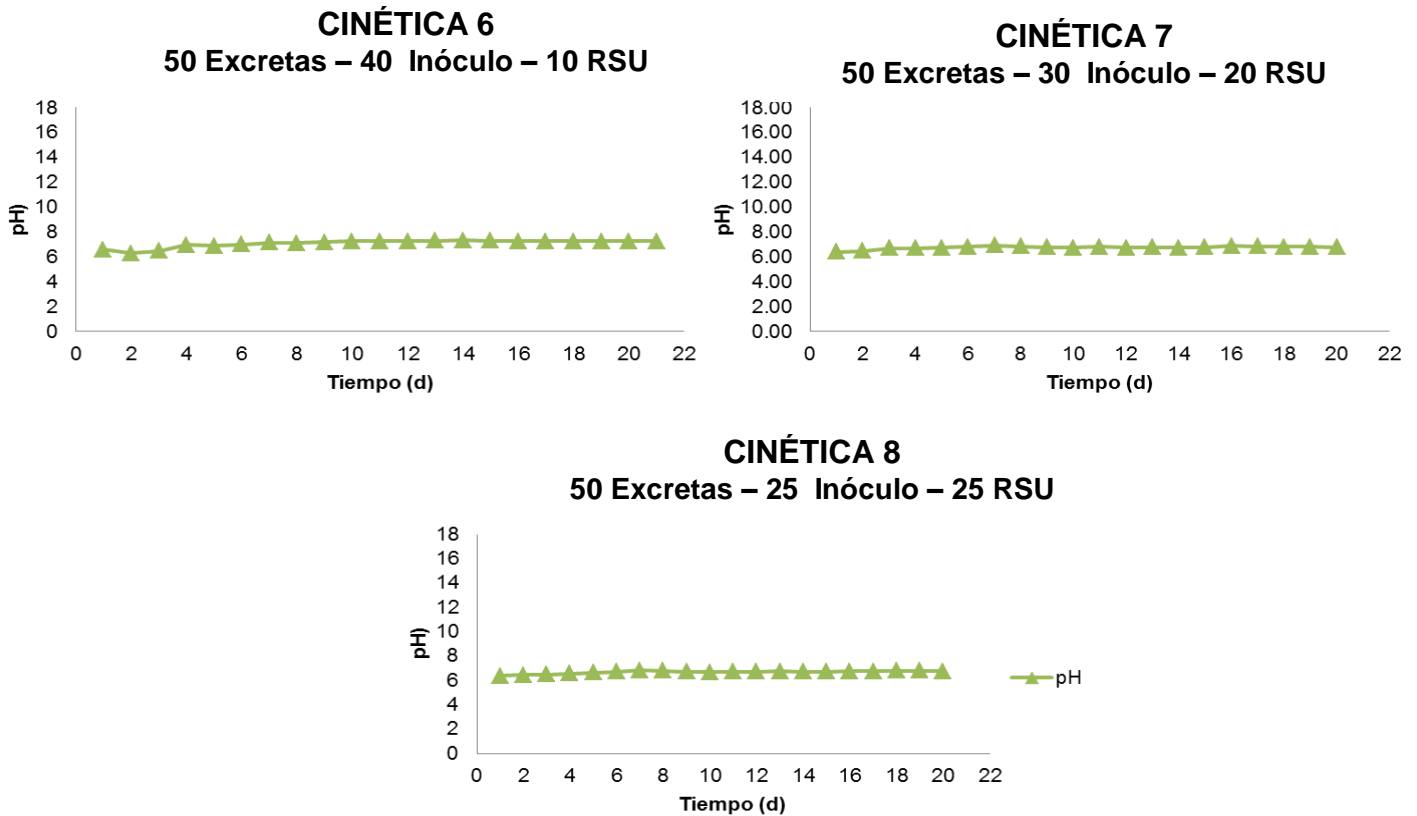


Figura 3.19 Comportamiento del pH de la co-digestión.

Uno de los parámetros que indican de manera inmediata el comportamiento de un reactor es el pH. Para el correcto funcionamiento de la digestión anaerobia es necesario un pH neutro o cercano a él, en la Figura 3.19 podemos observar el comportamiento del monitoreo diario de las tres cinéticas con base al parámetro de pH, en la cinética 6, se puede observar que el pH tiene un valor promedio de 7.09, el cual se encuentra cercano a la neutralidad. Para la cinética número 2 se puede observar que tuvo un valor promedio de 6.75. En la cinética 3, podemos observar que el pH disminuyó considerablemente con respecto a las dos anteriores cinéticas, el valor promedio fue de 6.68.

Analizando el comportamiento del pH podemos decir que conforme se fue moviendo la relación porcentual de las excretas con el inóculo y los RSU el pH hubo una

disminución significativa esto se puede deber a que los RSU al ser una homogenización de diversos residuos tienen una tendencia a la acidificación, aunque al realizar la mezcla con las excretas estas por tener un pH por encima del neutro es suficiente para neutralizar la acidez de los RSU y favorecer el proceso de digestión, la remoción de la materia y la producción de biogás.

Macías-Corral, 2008 realizó un estudio en un reactor de 6 L de la mezcla de excretas bovinas con RSU, presentando en sus experimentos un pH que oscila entre 6.4 y 7.3, los resultados obtenidos en este trabajo muestran una similitud en los valores del pH para las tres cinéticas las cuales están cercanas a la neutralidad, como resultado se puede decir que la homogenización de las excretas con los RSU tienen como resultado un pH cercano a la neutralidad favoreciendo el proceso de digestión anaerobia.

3.5.2.4 Producción diaria y acumulada de biogás co-digestión.

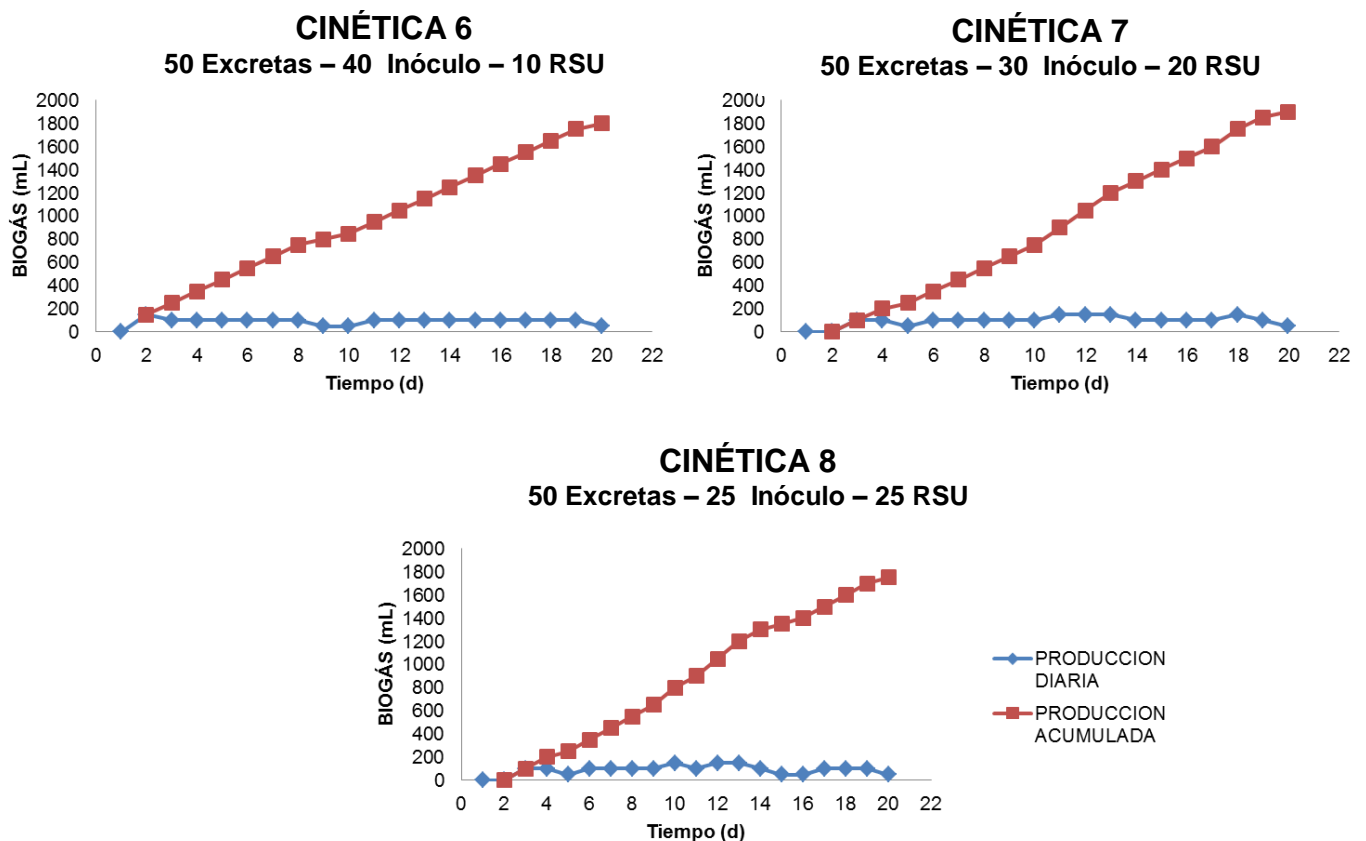


Figura 3.20 Monitoreo de la producción diaria y acumulada de biogás co-digestión.

En la Figura 3.20 se muestran los resultados de la producción diaria y del concentrado de biogás durante todo el periodo de monitoreo de las cinéticas. Para las tres cinéticas se puede observar que la tendencia en cuanto a producción diaria fue constante con valores que oscilan entre 50 hasta 150 mL

Para la cinética 6, se puede observar que la producción acumulada logró alcanzar 1850 mL. Para la cinética 7 esta tuvo un incremento significativo con respecto a la anterior cinética alcanzando un valor de 1950 mL. La cinética 8 a diferencia de las dos anteriores cinéticas su producción de biogás disminuyó alcanzó una producción acumulada de 1750 mL.

Analizado el comportamiento de la producción de biogás podemos observar que la mejor respuesta se obtuvo en la cinética 7 con una relación excretas-inóculo-RSU de 50-30-20 respectivamente superando a las otras dos cinéticas.

Macías-Corral, 2008 presentó en un estudio realizado en un reactor de 6 L obtuvo una producción acumulada de 6800 mL, haciendo una relación para tener la equivalencia con los reactores de 250 mL de las cinéticas presentadas en este trabajo tenemos una producción acumulada de 1700 mL. Los resultados obtenidos en el presente trabajo son similares a los presentados por Macías-Corral, en 2008.

Nota. En cada una de las cinéticas se presentan valores de cero en producción de biogás, esto debido a que la cinética fue analizada desde el primer día que se montó y por lo tanto en este primer día no hubo producción de biogás, si no 24 horas o hasta 48 horas después.

3.5.3 Comparación de la biodegradabilidad anaerobia excretas-inóculo contra la co-digestión.

En la tabla 3.6 se muestran la comparación de los resultados obtenidos en las ocho cinéticas.

Tabla 3.6 Comparativo de las cinéticas.

| Parámetro | Cinética | | | | | | | |
|--|--------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
| | Excretas – inóculo | | | | | Co-digestion con RSU | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| DQO _{SOLUBLE} Remoción (%) | 54.15 | 53.14 | 76.91 | 76.32 | 78.28 | 81 | 81 | 76 |
| pH | 7.08 | 6.99 | 7.72 | 7.87 | 7.91 | 7.09 | 6.75 | 6.68 |
| ST Remoción (%) | 49.15 | 67.47 | 81.48 | 92.91 | 85.84 | 88.39 | 80.43 | 83.24 |
| SV Remoción (%) | 64.25 | 65.46 | 85.48 | 91.79 | 89.20 | 91.13 | 81.47 | 83.20 |
| Producción Acumulada biogás | 300 | 1100 | 1450 | 1350 | 1150 | 1850 | 1950 | 1750 |

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 3.6 podemos observar que tomando en cuenta solo la relación excreta – inóculo, la mejor cinética es la 3 basándonos en que fue la que tuvo la mayor producción de biogás, además de que el porcentaje de remoción fue muy similar a las otras cinéticas con valores de remoción de 80% y en cuanto al pH se pudo observar una tendencia que se encuentra cercana a la neutralidad representando un sustrato adecuado en el proceso de digestión anaerobia.

Para el caso de la co-digestión con los RSU la mejor cinética fue la 7, tomando como base que fue la que tuvo la mayor producción de biogás, la remoción obtenida en esta cinética fue del 80% y el pH se mantuvo cercano a la neutralidad esto nos quiere decir que a pesar de manejar un sustrato ácido como los RSU al realizar la mezcla con las excretas el nuevo sustrato a tratar no afecta en el proceso de la digestión.

De acuerdo a lo anterior se pudo observar que la cinética 3 con una relación en porcentaje de excretas-inóculo de 70-30% y en la co-digestión la cinética 7 con una relación excretas-inóculo-RSU de 50-30-20%, ambas cinéticas muestran porcentajes similares solo se da una sustitución del porcentaje que pierden las excretas en la cinética 3 por un 20% el cual es adicionado por los RSU en la cinética 7, por lo tanto se observa que tuvieron una similitud en cuanto a la remoción de DQO_s, ST y SV.

Con respecto al pH se puede observar que el pH de las excretas que se encuentra por encima de la neutralidad logró neutralizar satisfactoriamente al pH ácido de los RSU por lo tanto la mezcla representa un sustrato adecuado para el proceso anaerobio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Una vez realizado el estudio del reactor de geomembrana y observando las condiciones bajo las que se operaba se puede concluir que los resultados mostrados en el presente trabajo fueron satisfactorios, se puede observar que al inicio del monitoreo del reactor geomembrana había una variación en la degradación, teniendo una remoción con base a su DQO_{total} entre 20 hasta 30% y un valor de DQO_s que entre 10 a 20% de remoción, esto durante los primeros diez días de monitoreo debido a que el reactor no era alimentado de manera constante. Una vez transcurridos los primeros diez días de monitoreo el reactor fue operado de forma continua y a partir del día once se observa un incremento en la degradación de la materia orgánica alcanzando un valor con base a su DQO_T entre 50 hasta un 70% de remoción y una remoción de DQO_s que va desde un 40 hasta 60%.

Con respecto al pH se puede observar que a la entrada del reactor se mantuvo un pH va desde 7.6 hasta 8 esto debido a que las excretas bovinas son un sustrato muy amigable y fácil de tratar, por otro lado el pH de salida también se mantuvo constante teniendo valores que van desde 6.3 hasta 6.55 con esto se concluye que el pH es adecuado para el proceso de digestión anaerobia. Con respecto a la temperatura se puede observar a pesar de que en la ciudad de Orizaba Veracruz el clima es templado no hubo variaciones durante el monitoreo del reactor manteniéndose una temperatura constante en la entrada (19-21°C), intermedio (24-25°C) y salida (18-19°C) del reactor de geomembrana.

Con respecto a la calidad el biogás se observó que en los primeros diez días de monitoreo el biogás alcanzaba un 35 a 38% de metano y a partir del día once se observa un incremento significativo en la cantidad de biogás logrando alcanzar un valor hasta de 49% de metano, con esto se concluye que el biogás producido por el reactor de geomembrana fue de calidad, esto se traduce en las actividades en las

cuales se emplea el biogás el cual cumple con su objetivo alcanzando una temperatura de 70°C para su gestión y aprovechamiento en la granja.

Para el caso de las primeras cinco cinéticas los mejores resultados se presentaron en las cinéticas 3 (70-30%) y 4 (60-40%) en relación excreta-inóculo con base a su DQOs se observó una remoción del 76% para ambos casos. Los ST y SV alcanzaron valores entre 80 – 90% de remoción. Además de que en estas dos cinéticas tuvieron la mejor producción de biogás con 1450 y 1350 mL respectivamente.

Para las últimas tres cinéticas se observó que el mejor resultado se presentó en la cinética 7 (50-30-20%) en relación excreta-inóculo-RSU con base a su DQO_s se observó una remoción del 80%. Con respecto a los ST y SV se observó que se logró alcanzar una remoción del 81% para ambos casos además que fue la que tuvo la mejor producción de biogás con 1950 mL.

Con respecto al pH para las ocho cinéticas se concluye que las excretas bovinas representan un sustrato adecuado para la digestión anaerobia, ya que en todas las proporciones utilizadas se mantuvo un pH cercano a la neutralidad.

El proceso de digestión anaerobia representa un método viable para el tratamiento de las excretas de ganado bovino y su aprovechamiento en la producción de energía. La mezcla de excretas frescas con un inóculo anaerobio acondicionado para su tratamiento, mejora el proceso de biodegradación y la producción de biogás.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que la alimentación al reactor siga siendo de forma continua para que se pueda mantener la remoción y la producción de biogás sea constante.

No dejar pasar mucho tiempo sin operar el reactor, debido a que la materia orgánica contenida dentro del reactor se puede empezar a solidificar y formar un taponamiento a la salida del reactor y esto puede reducir la cámara de biogás.

En caso de taponamiento, adicionarle agua al reactor por la salida, esto con el objetivo que la presión del agua deshaga las partes que se hayan solidificado.

Se recomienda que cuando se prepara la alimentación de entrada (dilución sustrato-agua) retirar todos los residuos que no digiere la vaca como el pasto, debido a que estos pueden causar interferencia en el proceso de la digestión anaerobia.

No permitir que personas ajenas operen el reactor, esto debido a que pueden alimentar de forma incorrecta el reactor.

Se hará la recomendación al dueño de la granja de acuerdo a los resultados presentados en este trabajo para realizar la co-digestión con residuos sólidos urbanos para que el reactor tenga una mayor eficiencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alastair J. W., y Bjarne M. H. (2012), *Thermophilic anaerobic co-digestion of separated solids from acidified dairy cow manure*. *Bioresource Technology* **114**:195–200

Álvarez R., and Liden G., (2008) *Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production*. IIDEPROQ, UMSA, Plaza del Obelisco 1175, La Paz, Bolivia. *Biomass and bioenergy* **33**(3):527–533

Ashekuzzaman S.M., T. G. and Poulsen (2010) *Optimizing feed composition for improved methane yield during anaerobic digestion of cow manure based waste mixtures*. *Bioresource Technology* **102**(3):2213–2218

Bastone, D.J., Keller, I. Angelidaki, S.V. Kalyuzhnyi, S.G. Pavlostathis, A. Rozzi, W.T.M. Sanders, H. Siegrist y V.A. Vavilin, (1999) *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*, IWA Publishing

Blanco D. (2011) *Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost*. Instituto del medio ambiente, recursos naturales y biodiversidad, área de ingeniería química, Universidad de León.

Cheng S., Zifu Li, Mang H.P., Huba E. M., (2014) *Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries*, Department of Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, China **34**:387–400

CICEANA (Centro de información y comunicación ambiental de norte america A. C.)
Consulta información, generación de residuos sólidos no peligrosos 2015
www.ciceana.org.mx

Cotana F., Petrozzi A., Pisello A. L., Coccia V., Cavalaglio G.M., Moretti E., (2013) *An innovative small sized anaerobic digester integrated in historic building*. Energy Procedia **45**:333 – 341

De la Torre N. (2008) *Digestión anaerobia en comunidades rurales*. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela politécnica superior. Ingeniería insdustrial, Departamento de ingeniería térmica y fluidos.

Financiera rural, consulta de indicadores de producción de ganado bovino datos de 2009. www.fnd.gob.mx

Gasque G. R. (2008) *Enciclopedia bovina*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de medicina veterinaria y zootecnia.

Gilroyed B. H., Reuter T., Chu A., Hao X., Xu W., McAllister T. A., (2010) *Anaerobic digestion of specified risk materials with cattle manure for biogas production*. Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC), Lethbridge Research Centre, P.O. Box 3000, Lethbridge, Alberta, Canada. *Bioresource Technology* **101**:5780–5785

Gong W., Liang H., Li W., Wang Z. (2011) *Selection and evaluation of biofilm carrier in anaerobic digestion treatment of cattle manure*. School of Engineering, Energy **36**(5):3572-3578

Guardado Chacón J. A. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. Ciudad de la Habana Cuba: Editorial Cubasolar.

Iglesias M. L. (1994) *El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente*. Ministerio de agricultura pesca y alimentación, secretaria general de estructuras agrarias.

Larios C. A. y Ponce O. (2011) *Manejo de residuos sólidos*. Guía para personal de Hondupalma, Cooperación Internacional para el Desarrollo Tegucigalpa Honduras.

Marti O. N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process* Universidad-Publishers. Florida USA.

Martínez I., y Cruz M. R., (2009) *El uso de químicos veterinarios y agrícolas en la zona ganadera de México, centro de Veracruz, México y el posible impacto ambiental*. Acta Zoológica Mexicana **25**(3): 673-681

Moreno C. L., Ginés L. G., (2014). *Seguimiento y estabilización de un reactor anaerobio a nivel piloto para el tratamiento de las excretas de ganado bovino*. Informe de residencias profesionales.

Omar, R., Harun, R. M., Mohd Ghazi, T. I., Wan Azlina, W. A. K. G., Idris, A., & Yunus, R. (2008, November). Anaerobic treatment of cattle manure for biogas production. In Proceedings Philadelphia, Annual meeting of American Institute of Chemical Engineers (pp. 1-10).

Rico C., Rico J:L., Tejero I., Muñoz N., Gomez B., (2011) Anaerobic digestion of the liquid fraction of dairy manure in pilot plant for biogas production: Residual methane yield of digestate. Waste Management **31**:2167–2173

Sanz J. L. (2013), *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Departamento de biología molecular, Facultad de ciencias UAM.

Sagarpa (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación) Consulta de información sobre alimentación de bovinos 2003. www.sagarpa.gob.mx

SEMARNAT (Secretaría de medio ambiente y recursos naturales) 2012. Consulta de indicadores de producción de ganado bovino. www.semarnat.gob.mx

SIAP (Servicio de información estadística agroalimentaria y pesquera) 2013. Consulta de indicadores de producción de ganado bovino. www.siap.gob.mx.

Wallace J.M. y Safferman I. S. (2013) *Anaerobic membrane bioreactors and the influence of space velocity and biomass concentration on methane production for liquid dairy manure*. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, Michigan State University, 524 S. Shaw Lane, Room 212

Yimer S., Yimer B., Sahu O., (2014) *Biogas Production Using Geomembrane Plastic Digesters as Alternative Rural Energy Source and Soil Fertility Management*. Department of Chemical Engineering, KIOT, Wollo University, Kombolcha, Ethiopia. *Sustainable Energy* 2, no. 1:12-19.

Yin D., Liu W., Zhai N., Yang G., Wang X., Feng Y., Ren G., (2014) *Anaerobic digestion of pig and dairy manure under photo-dark fermentation condition*. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China. *Bioresource Technology* **166**:373–380.