



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE LOS DESECHOS SÓLIDOS  
DE UN RASTRO MUNICIPAL DEL ESTADO DE MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**QUÍMICO DE ALIMENTOS**

P R E S E N T A

***Isaac David Burgos Zepeda***

MÉXICO, D.F. 2010





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE:** M. en C. Raúl Aguilar Caballero

**VOCAL:** Dra. Hilda Calderón Villagómez

**SECRETARIO:** Dra. Alejandra Castro González

**1er. SUPLENTE:** Dr. Francisco Ruiz Teran

**2do. SUPLENTE:** Dr. Jorge Aburto Anell

### **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorio de Microbiología, Departamento de Ingeniería Ambiental, Edificio Bernardo Quintana, Posgrado Facultad de Ingeniería, UNAM.

### **ASESOR DEL TEMA:**

**Dra. Alejandra Castro González**

\_\_\_\_\_

### **SUSTENTANTE:**

**Isaac David Burgos Zepeda**

\_\_\_\_\_

## **Agradecimientos**

A la Dra. Alejandra Castro González por brindarme su entero apoyo y por ser un excelente ejemplo de trabajo, honestidad y profesionalismo

Al MVZ. Atonatiu Edmundo Gómez Martínez y la M en C. Ruth Bustamante García por su amistad y apoyo

A mi mamá la Prof. Leonor Yolanda Zepeda Sánchez por mostrarme el mundo e influir en el desarrollo de mi forma de pensar

A mi papá el M. en I. Luis Burgos Serrano

A mis hermanos, la Dra. Mónica Yolanda Burgos Zepeda y el Ing. José Luis Obet Burgos Zepeda por brindarme su ejemplo y su respeto

A los miembros del jurado por darse el tiempo de revisar mi investigación

A mis profesores de la Facultad de Química

A la Universidad Nacional Autónoma de México por creer en la juventud mexicana y fomentar el progreso del país

# Índice

Índice de contenidos.....	I
Índice de figuras.....	III
Índice de tablas.....	VI
Abreviaturas.....	VIII
Resumen.....	IX
1. Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Hipótesis.....	3
2. Capítulo 2. Fundamentos.....	4
2.1 Industria cárnica en México.....	4
2.2 Rastros.....	6
2.3 Desechos en rastros.....	10
2.4 Tratamiento de residuos.....	13
2.5 Cambio climático.....	21
2.6 Energías renovables.....	25
2.7 Biocombustibles.....	30
2.7.1 Biocombustibles sólidos.....	33
2.7.2 Biocombustibles líquidos.....	33
2.7.3 Biogás.....	35
2.7.3.1 Costos de los combustibles fósiles versus biogás.....	38
2.7.3.2 Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).....	41

2.8 Degradación anaerobia.....	42
2.9 Biogás.....	48
2.10 Ecuaciones para la predicción de biogás en degradación anaerobia.....	51
2.11 Usos del lodo digerido.....	53
2.12 Tipos de reactores anaerobios.....	56
2.13 Diseño de reactores anaerobios.....	64
2.14 Tratamiento de desechos en rastros.....	72
2.15 Normatividad.....	75
3. Capítulo 3. Metodología.....	80
3.1 Estudio de caso.....	80
3.2 Caracterización de desechos sólidos y líquidos del rastro.....	82
3.3 Pruebas anaerobias.....	83
3.4 Diseño del reactor anaerobio.....	87
4. Capítulo 4. Resultados y discusión.....	90
4.1 Desechos del rastro.....	90
4.2 Arranque y operación del reactor anaerobio.....	94
4.3 Cálculo del reactor anaerobio para ser instalado en el rastro.....	114
4.4 Contribuciones ambientales.....	118
4.5 Contribuciones sociales.....	119
4.6 Contribuciones tecnológicas.....	119
4.7 Contribuciones económicas.....	120
5. Capítulo 5. Conclusiones.....	121
Referencias.....	122

## Índice de figuras

Figura 2.1	Producción y consumo aparente de cárnicos a nivel nacional de 1980 a 2002.....	5
Figura 2.2	Ubicación de rastros controlados por SAGARPA.....	8
Figura 2.3	Pila de residuos.....	15
Figura 2.4	Estructura de ladrillos, muro de compostero.....	15
Figura 2.5	Diseño del compostero.....	16
Figura 2.6	Esquema simplificado de la historia y futuro de la concentración de CO <sub>2</sub> en la atmósfera.....	22
Figura 2.7	Geotérmica de alta energía.....	26
Figura 2.8	Central hidroeléctrica.....	27
Figura 2.9	Convertidor de energía de olas "Pelamis".....	29
Figura 2.10	Mecanismo celda de energía azul.....	29
Figura 2.11	Reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero de determinados biocombustibles en comparación con combustibles fósiles.....	31
Figura 2.12	Tendencias en el consumo de biocombustibles para el transporte.....	32
Figura 2.13	Tractor de gasógeno.....	35
Figura 2.14	Algas <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> .....	37
Figura 2.15	Análisis de ecosistema para un digestor de polietileno basado en 7885 kg de excrementos frescos.....	39
Figura 2.16	Diagrama de flujo para implementar un proyecto MDL.....	41
Figura 2.17	Producción de metano acumulada para distintos subproductos de cerdo en rastros, incubados a 55°C a diferentes diluciones.....	44

Figura 2.18	Crecimiento de bacterias.....	45
Figura 2.19	Etapas involucradas en la obtención de biogás.....	47
Figura 2.20	Esquema de la generación de biogás y su utilización.....	49
Figura 2.21	Alternativas de rendimiento de 1m <sup>3</sup> de biogás.....	51
Figura 2.22	Digestor de flujo-tapón o salchicha.....	59
Figura 2.23	Reactor de tasa baja, reactor de tasa alta, Combinados.....	62
Figura 2.24	Reactor tipo hindú.....	63
Figura 2.25	Reactor tipo chino.....	64
Figura 2.26	Esquema de un gasómetro.....	71
Figura 3.1	Rastro municipal de Jilotepec, Estado de México.....	80
Figura 3.2	Zona de instalación para el reactor anaerobio en el rastro.....	81
Figura 3.3	Plano del rastro y posible zona de construcción del reactor para el tratamiento de los desechos.....	81
Figura 3.4	Determinación de sólidos totales, fijos y volátiles.....	83
Figura 3.5	Reactores empleados durante las pruebas anaerobias a régimen discontinuo.....	84
Figura 3.6	Esquema simplificado de los reactores en régimen discontinuo.....	85
Figura 3.7	Diseño del reactor empleado en régimen continuo.....	87
Figura 3.8	Reactor anaerobio experimental a régimen continuo.....	88
Figura 4.1	Forma teórica de la cámara de fermentación del reactor.....	95
Figura 4.2	Esquema de la fosa para la construcción del reactor anaerobio tipo salchicha.....	95
Figura 4.3	Comportamiento del pH a lo largo de la experimentación con el reactor anaerobio.....	96



Figura 4.4	Relación de la producción de biogás con respecto al pH de operación.....	97
Figura 4.5	Producción de biogás en la experimentación.....	98
Figura 4.6	Comparación de los 4 reactores experimentales en la producción semanal de biogás.....	100
Figura 4.7	Muestra el comportamiento del reactor 1 y los días de muestreo.....	101
Figura 4.8	Comportamiento de ST, SV y SF durante la experimentación en el reactor anaerobio.....	102
Figura 4.9	Porcentaje de remoción de sólidos durante la experimentación con el reactor anaerobio.....	106
Figura 4.10	Comportamiento en la obtención de biogás del reactor 1 en batch y en forma continua.....	107
Figura 4.11	Volumen de biogás promedio con respecto al TRH.....	108
Figura 4.12	Aprovechamiento del sustrato por las bacterias anaerobias a diferentes TRH.....	108
Figura 4.13	Remoción de ST con respecto al TRH en el reactor experimental.....	109
Figura 4.14	Porcentaje de remoción con respecto al TRH.....	110
Figura 4.15	Cantidad de biogás acumulado con respecto al TRH.....	111
Figura 4.16	Rendimiento de biogás con respecto a los ST.....	111
Figura 4.17	Concentración de ST del influente y efluente.....	112
Figura 4.18	Cantidad de biogás con respecto al porcentaje de remoción.....	113
Figura 4.19	Porcentajes de remoción con respecto al TRH.....	116
Figura 4.20	Variación de ST y biogás acumulado durante el experimento.....	117

## Índice de Tablas

Tabla 2.1	Relación de rastros municipales y establecimientos TIF en México.....	9
Tabla 2.2	Opciones de manejo de residuos.....	10
Tabla 2.3	Emisión de compuestos volátiles durante el composteo aerobio de desperdicio en rastros.....	14
Tabla 2.4	Factores de emisión para diferentes tratamientos.....	21
Tabla 2.5	Potencial de calentamiento global de diferentes gases de efecto invernadero.....	24
Tabla 2.6	Emisiones globales de metano procedentes del manejo del estiércol.....	24
Tabla 2.7	Producción de biocombustibles en diferentes países.....	32
Tabla 2.8	Composición de biogás.....	37
Tabla 2.9	Beneficios directos de un ejemplo de aplicación de un sistema de degradación anaerobia.....	40
Tabla 2.10	Especies y características de las bacterias metanogénicas.....	42
Tabla 2.11	Fases primordiales en la obtención de biogás.....	45
Tabla 2.12	Reacciones propias de las bacterias metanogénicas.....	46
Tabla 2.13	Producción específica de biogás.....	48
Tabla 2.14	Obtención de biogás por distintas fuentes.....	49
Tabla 2.15	Equivalencia del biogás con otros combustibles.....	50
Tabla 2.16	Valores medios de consumo de biogás en artefactos.....	50
Tabla 2.17	Características de los lodos.....	55
Tabla 2.18	Clasificación de reactores anaerobios de acuerdo al TRH, TRS y TRM.....	57
Tabla 2.19	Producción estimada de residuos.....	67
Tabla 2.20	Producción de biogás proveniente de diversas fuentes.....	69
Tabla 2.21	Tipos de tratamientos previos al tratamiento anaerobio de desechos en rastros.....	74

Tabla 3.1	Resultados de la caracterización inicial de los desechos.....	82
Tabla 3.2	Condiciones experimentales en los reactores durante las pruebas anaerobias.....	84
Tabla 3.3	Parámetros monitoreados y equipo empleado durante las pruebas anaerobias.....	86
Tabla 3.4	Proporciones de $\text{NaHCO}_3$ empleadas en la Experimentación.....	86
Tabla 3.5	Mediciones experimentales realizadas en la etapa continua.....	89
Tabla 4.1	Resultados de la caracterización inicial de los desechos sólidos.....	90
Tabla 4.2	Caracterización de sólidos en los desechos líquidos del rastro (sangre).....	91
Tabla 4.3	Caracterización de sólidos totales suspendidos para los desechos líquidos del rastro (sangre).....	92
Tabla 4.4	Caracterización de ST, SV y SF en diferentes desechos.....	93
Tabla 4.5	Resultados de las pruebas anaerobias para los cuatro reactores.....	97
Tabla 4.6	Resultados de las determinaciones de ST, SV y SF para el reactor 1.....	98
Tabla 4.7	Porcentajes de remoción con respecto a los sólidos removidos en la operación del reactor anaerobio.....	99
Tabla 4.8	Mediciones de sólidos durante el régimen continuo del reactor.....	103
Tabla 4.9	Porcentajes de remoción y días de muestreo en régimen continuo.....	104
Tabla 4.10	Producción de biogás con respecto a los ST removidos y TRH durante la operación del reactor continuo.....	105
Tabla 4.11	Requerimientos y costos gas LP – biogás del rastro municipal de Jilotepec.....	120

## Abreviaturas

<b>ATP:</b>	Adenocín Tri- Fosfato	<b>N<sub>2</sub>:</b>	Nitrógeno
<b>°C:</b>	Grados centígrados.	<b>NOM:</b>	Norma Oficial Mexicana
<b>CERs:</b>	Reducciones Certificadas de Emisiones	<b>O<sub>2</sub>:</b>	Oxígeno
<b>CH<sub>4</sub>:</b>	Metano	<b>ODM:</b>	Partícula Orgánica del sustrato
<b>CO<sub>2</sub>:</b>	Dióxido de Carbono	<b>OM:</b>	Porcentaje de Materia Orgánica Seca
<b>CS:</b>	Cantidad de otro Sustrato	<b>P:</b>	Fósforo
<b>DM:</b>	Porcentaje de Materia Seca en el sustrato	<b>P<sub>biogás</sub>:</b>	Producción de biogás
<b>dm<sup>3</sup>:</b>	Decímetros cúbicos	<b>SF:</b>	Sólidos Fijos
<b>DNA:</b>	Autoridad Nacional Designada	<b>S<sub>org total</sub>:</b>	Cantidad de Materia Orgánica total utilizada en el proceso
<b>DOEs:</b>	Entidades Operacionales Designadas	<b>SS:</b>	Sólidos Suspendidos
<b>empt:</b>	Equivalentes en toneladas de petróleo	<b>ST:</b>	Sólidos Totales
<b>g:</b>	Gramo	<b>SV:</b>	Sólidos Volátiles
<b>GC:</b>	Porcentaje de Guanina y Citosina	<b>tr:</b>	Tiempo de Residencia
<b>GJ:</b>	Giga Joules	<b>t:</b>	Toneladas de Sustrato o Materia Prima
<b>h:</b>	Hora	<b>TIF:</b>	Tipo Inspección Federal.
<b>H<sub>2</sub>:</b>	Hidrógeno	<b>Ton:</b>	Toneladas
<b>H<sub>2</sub>S:</b>	Sulfuro de Hidrógeno	<b>TRH:</b>	Tiempo de Residencia Hidráulico
<b>K:</b>	Potasio	<b>TRM:</b>	Tiempo de Retención de Microorganismos
<b>Kcal:</b>	Kilocalorías	<b>TRS:</b>	Tiempo de Retención de Sólidos
<b>Kg:</b>	Kilogramo	<b>USD:</b>	Dólares (EEUU)
<b>L:</b>	Litros	<b>V/V:</b>	Volumen / Volumen
<b>m<sup>3</sup>:</b>	Metros cúbicos	<b>VCD:</b>	Volumen de Carga Diaria
<b>MBP:</b>	m <sup>3</sup> / Ton de ODM	<b>VCF:</b>	Volumen de la Cámara de Fermentación
<b>MDL:</b>	Mecanismo de Desarrollo Limpio.	<b>V<sub>CH<sub>4</sub></sub>:</b>	Volumen de Metano generado
<b>mL:</b>	Mililitros	<b>VCT:</b>	Volumen de la Carga Total
<b>M<sub>Máx.</sub>:</b>	Cantidad Máxima de Metano Obtenible	<b>V<sub>reactor</sub>:</b>	Volumen de materia a degradar dispuesta en el reactor

## Resumen

En este trabajo se experimentó con los residuos sólidos del rastro municipal de Jilotepec, Estado de México. Se realizaron inicialmente pruebas anaerobias con reactores escala laboratorio de tipo flujo-tapón con agitación manual diaria, realizando dos corridas, una sin inóculo y la otra utilizando excremento de cerdo en un 30% como inóculo. Dichas corridas consistieron en determinar las condiciones ideales de producción de biogás a régimen no continuo (batch) de cuatro mezclas diferentes utilizando cuatro digestores para cada corrida. En el reactor 1 se introdujo una mezcla de desechos sólidos con agua 1:1 v/v, en el reactor 2 se introdujo una mezcla de desechos sólidos con sangre 1:1 v/v, en el reactor 3 se introdujo únicamente sangre y finalmente en el reactor 4 se introdujeron únicamente desechos sólidos. Además se determinó que las variables involucradas en la producción de biogás fueron el pH, cantidad de sólidos totales y tiempo de residencia.

La corrida con inóculo no produjo biogás, esto debido al alto % de ST a causa del excremento empleado. Sin embargo en la corrida sin inóculo se obtuvo biogás en los 4 reactores aunque el reactor 1 fue el que más biogás produjo obteniendo 6L de biogás/kg equivalentes a 10.8L de biogás/kg de ST de desechos sólidos, ya que el porcentaje de ST en los desechos sólidos es de 55.4%. Ésta mezcla se consideró como la óptima para establecer los parámetros de arranque para la obtención de biogás teniendo 570g de desechos sólidos mezclados con 1.5L de agua. Una vez conocidas las condiciones óptimas de producción de biogás, se estudió la cantidad de biogás generada a régimen continuo para tiempos de residencia de 1,2, 10, 11 y 12 días obteniéndose un máximo de 168L de biogás/kg de ST.

Asimismo se determinó que en el rastro se generarían aproximadamente 12,000L de biogás/día obtenidos por el tratamiento anaerobio de 2,000 kg diarios de desecho utilizando un reactor cilíndrico de 17 x 3.4 metros y operando a un tiempo de residencia de 12 días introduciendo cargas diariamente. De tal manera que si se sustituyera el consumo diario de 300L de gas LP por biogás considerando que éste contiene 60% de metano, se tendría el ahorro total del consumo de gas LP además de tener un excedente diario de biogás de 9,965L que desde el punto de vista económico se traduciría en un ahorro de 30, 720 pesos al mes considerando 5 días hábiles por semana.

Cabe resaltar la importancia de este trabajo, debido a que es una de las pocas investigaciones que se han realizado referentes al tratamiento anaerobio de desechos sólidos provenientes de un rastro en México

## Capítulo 1

### 1.1. Introducción

En México existen cerca de 1231 rastros, de los cuales aproximadamente 80 cuentan con la certificación TIF y 60 pertenecen al territorio del Estado de México donde se procesan cerca de 20,485 cabezas de ganado mensualmente.

En los establecimientos que no cuentan con dicha certificación, existe un grave riesgo de contaminación tanto para los alrededores como para la carne producida, y en consecuencia para el consumidor, debido al pésimo y en algunas ocasiones nulo manejo de los residuos o desechos orgánicos inherentes a la trata de animales que repercute directamente sobre las condiciones de operación. Por esto, es necesaria la realización de este proyecto, ya que provee una alternativa para disminuir la problemática en el tratamiento de residuos, permitiendo aumentar la calidad de los productos cárnicos obtenidos en estos sitios.

Es por ello que se pretende implementar sistemas de tratamiento para dichos residuos como parte de la certificación de estos rastros, con lo que es posible aumentar la producción cárnica en estos establecimientos cubriendo de este modo su creciente demanda e incluso reduciendo el costo en el mercado de los productos cárnicos y sus derivados.

Dentro de los sistemas de tratamiento, se tiene contemplada la construcción de bio-reactores de diseño simple y de bajo costo de mantenimiento, que permitan aprovechar al máximo los subproductos de la matanza obteniendo con esto un doble beneficio para el productor que además de lograr la certificación, reduce costos de proceso.

Por otra parte se sabe que los desechos antes mencionados, son ricos en materia orgánica que sirve de fuente alimenticia para bacterias metanogénicas por lo que es posible determinar sus condiciones óptimas de crecimiento y consecuentemente las condiciones de degradación de los desechos orientadas a la producción de gas metano o biogás, el cual en otras etapas del proceso de matanza sirve como combustible en diferentes etapas del proceso dentro del mismo establecimiento.

Para ello se deben realizar diversos estudios de laboratorio, que ayuden a estandarizar las condiciones de proceso en el tratamiento de residuos a fin de hacer más eficiente la obtención de biogás, y su aprovechamiento ya sea como combustible fósil o como precursor de energía eléctrica.

Por otro lado, se busca minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero que son lanzadas a la atmósfera debido a la actividad ganadera partiendo de las premisas definidas en la realización de este proyecto, además de concientizar a quienes trabajan en este sector en lo referente al impacto ambiental de su actividad.

Cabe resaltar la importancia de este trabajo, debido a que es una de las pocas investigaciones que se han realizado referentes al tratamiento de residuos sólidos por la vía de la degradación anaerobia.

## **1.2. Objetivos**

- Determinar las distintas variables físicas y químicas involucradas en la degradación de los desechos orgánicos, utilizando un sistema anaerobio de poco mantenimiento.
- Establecer los parámetros de arranque para la obtención del biogás, variando cantidad de materia orgánica y presencia de inóculo.
- Estudiar la factibilidad del aprovechamiento de los residuos sólidos, evaluando la eficiencia del proceso de degradación anaerobia.

## **1.3. Hipótesis**

Durante la realización de este proyecto, se trabajará bajo la hipótesis de que los desechos orgánicos sólidos producidos en los rastros municipales son aptos para degradarse en un reactor vía anaerobia, bajo un diseño rudimentario y de muy poco mantenimiento, alcanzando una alta eficiencia en su producción de metano.



## Capítulo 2 Fundamentos

### 2.1 Industria cárnica en México

En México, la industria ganadera forma parte del eje principal de su economía, prueba de esto es que su producción se da en todas las regiones ecológicas que posee debido a la variedad de climas con las que cuenta el país, abarcando aproximadamente el 60% de la superficie del territorio (SAGARPA, 2009). Dentro de este porcentaje se consideran los sistemas de producción tecnificados, semitecnificados y rurales o traspatio, siendo los estados con mayor producción: Querétaro, Yucatán y Aguascalientes.

En los últimos años se ha presentado un crecimiento de dicha actividad debido a la necesidad de abastecer la demanda interna y externa de los distintos tipos de carne. Por ello, en la parte norte del país se ha dado un gran desarrollo tecnológico, mientras que en la región sur se lleva a cabo una etapa de extensión, lo que ha favorecido a su vez el crecimiento de la economía primaria en un 3.3% en 2008, en donde la ganadería ocupa un 30% de esta (INEGI, 2009). La producción y consumo de la carne está sujeta a diversas variables como la época del año, el poder adquisitivo de la población y los distintos hábitos culturales por lo cual, como cualquier otro producto, su crecimiento está relacionado estrechamente al consumo aparente en el mercado nacional (Figura 2.1).

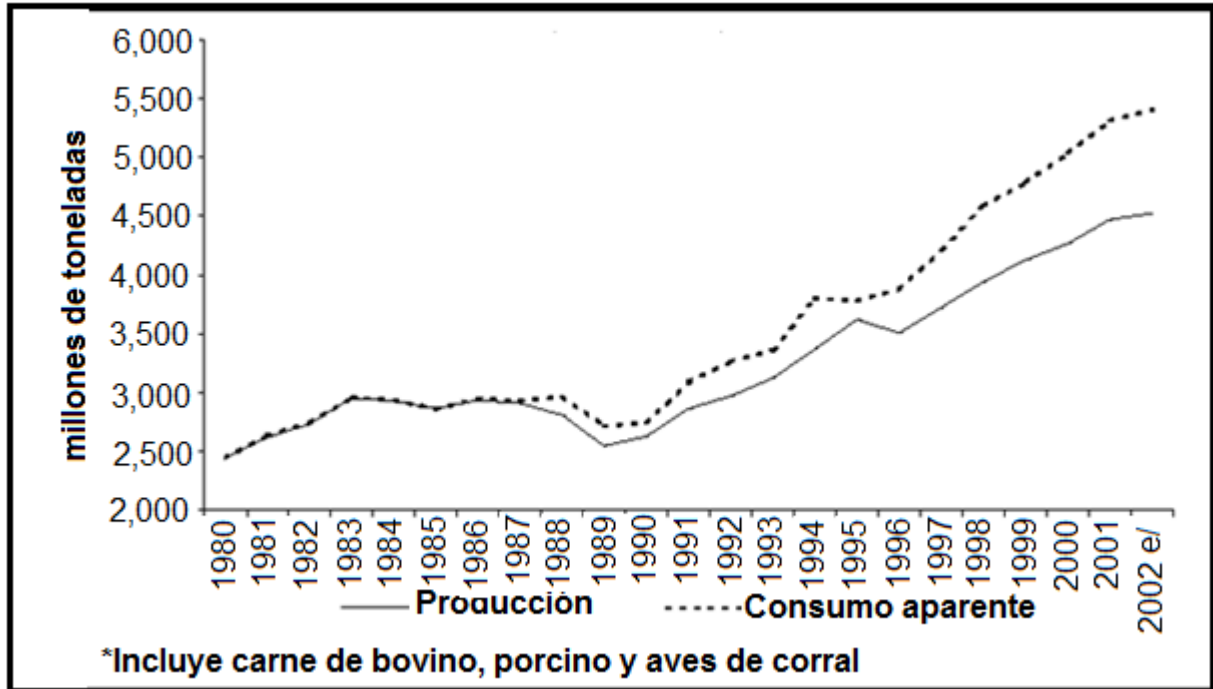


Figura 2.1 Producción y consumo aparente de cárnicos a nivel nacional de 1980 a 2002 (CEFP, 2009)

México se ubica en el sexto lugar entre los principales exportadores de la carne bovina a nivel mundial (PROCISUR, 2009) siendo Estados Unidos nuestro principal mercado seguido de Rusia y Japón. Debido a la demanda mundial en crecimiento, México ha tenido que hacer más eficiente su producción cárnica a demás de tener especial cuidado en la calidad de la misma, para cumplir lo anterior desde 1974 se ponen en práctica las inspecciones sanitarias de los centros de matanza dado por los diferentes riesgos microbiológicos a los que está sujeta la carne y que podría afectar directamente la del consumidor.

Debido al impacto ecológico que éste representa, es importante estudiar la industria cárnica desde una perspectiva ambiental. Sobre todo por el tipo de residuos que se obtienen de esta práctica, así como las repercusiones en los alrededores de un rastro o centro de matanza.

## 2.2 Rastros

Un rastro es un centro de sacrificio adaptado para llevar a cabo la matanza higiénica de los animales de los cuales se obtiene la carne, con el propósito de distribuir la producción hacia distintos centros de comercialización (Lawrie, 1998). Un rastro debe contar con distintas áreas básicas tales como:

- Unidad de producción: Conformada por cajón de matanza para porcinos y cajón de matanza para bovinos
- Área complementaria interna: Zona de destace, zona de evisceración, zona de inspección y sellado.
- Áreas complementarias exteriores: Caseta de control, rampa de descarga, corrales para ganado mayor y menor, corrales de espera, baño antemortem y anexo para sacrificio de pollos.
- Incinerador de carne
- Depósito de esquilmos: Aquí se depositan todas las secciones del animal que no son comestibles, vísceras, pelo, piel, pezuñas y cuernos.
- Tanque elevado para almacenamiento de agua.

De acuerdo a ciertos criterios de control sanitario, existen distintos tipos de rastro, los cuales se clasifican de la siguiente manera:

- Rastros Municipales

Son inspeccionados por la Secretaría de Salud de México (SSA) y únicamente controla la parte sanitaria de la carne, siendo sus funciones las siguientes:

- a) Matanza

- b) Manejo de canales que consiste en el corte de carnes

- c) Comercialización directa

- Rastros TIF ( Tipo Inspección Federal)

Son aquellos rastros que además de presentar servicios básicos como los que proporcionan los rastros municipales, permiten la industrialización de los productos de la carne. La cual se envía a centros urbanos para su comercialización y exportación; son inspeccionados y regulados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y la SSA, dichos rastros cumplen con las siguientes funciones:

- a) Matanza

- b) Manejo de canales

- c) Empacado de carnes

- d) Industrialización de esquilmos. Aprovechamiento de los desechos cárnicos para la producción de harinas y comprimidos destinados a la obtención de alimento para animales

- Rastros Clandestinos

Aquellos que no tienen ningún tipo de control y pertenecen a actividades traspatio.

Es importante mencionar que en el territorio Mexicano existen alrededor de 1,231 rastros registrados TIF y Municipales (Villanueva, 1998). La mayoría de ellos ubicados en la zona centro-sur del País (SAGARPA, 2009) debido a las condiciones climatológicas, las cuales favorecen el desarrollo del ganado (Figura 2.2).

Además de que es un punto estratégico para la distribución de la carne hacia los distintos puntos de consumo. En la Tabla 2.1 se muestra un listado con el número de rastros TIF y municipales que operan en cada estado de la República Mexicana.



Figura 2.2 Ubicación de rastros controlados por SAGARPA (SAGARPA, 2009).

**Tabla 2.1 Relación de rastros municipales y establecimientos TIF en México (Villanueva, 1998).**

<b>Estado</b>	<b>Rastros TIF**</b>	<b>Rastros municipales***</b>
Aguascalientes	5	29
Baja California Norte	3	4
Baja California Sur	--	9
Campeche	--	17
Coahuila	--	13
Colima	3	14
Chiapas	2	52
Comarca lagunera	--	28
Chihuahua	6	38
Durango	1	32
Guerrero	--	37
Guanajuato	4	41
Hidalgo	--	46
Jalisco	4	146
Estado de México	1	50
Michoacán	1	44
Morelos	--	19
Nayarit	--	39
Nuevo León	5	*
Oaxaca	2	*
Puebla	1	28
Querétaro	--	12
Quintana Roo	--	12
San Luis Potosí	1	35
Sinaloa	3	20
Sonora	16	93
Tabasco	1	44
Tamaulipas	4	47
Tlaxcala	1	7
Veracruz	6	137
Yucatán	2	29
Zacatecas	4	33

\*No proporcionaron datos

\*\*Información proporcionada por establecimientos TIF- SAGAR, 1995.

\*\*\*Información proporcionada por la Secretaría de Ganadería de cada estado, 1995.

--No existen establecimientos TIF

### 2.3 Desechos en Rastros

Tan sólo en el Estado de México, se sacrifican cerca de 20,485 cabezas de ganado mensualmente (SAGARPA, 2009). De las cuales, aproximadamente 20 a 25% son desechos conformados por: Sangre, heces, residuos de alimento, contenido gástrico ruminal, grasa y pedacería, cuernos, pezuñas, cerdas, órganos decomisados, animales muertos, entre otros no comestibles, además de las aguas residuales (Hejnfelt y Angelidaki, 2009). Dicho volumen de sacrificio ganadero corresponde a cerca de 1,872 toneladas de desechos, de los cuales es posible aprovechar el 75% a través de diferentes métodos (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2 Opciones de manejo de residuos (COFEPRIS, 2009)**

	Compostaje	Biodigestión	Planta de rendimiento	Relleno sanitario	Incineración	Encalar y enterrar
Sangre		✓	✓			
Heces	✓	✓				
Residuos de alimentos	✓	✓				
Contenido gástrico/ruminal	✓	✓				
Grasa y pedacería	✓	✓	✓			
Cuernos, pezuñas y otros no comestibles			✓	✓		
Órganos decomisados					✓	✓
Animales muertos					✓	✓

En el caso de la sangre es necesario mencionar que, debido a su capacidad contaminante, se debe evitar a toda costa su descarga al drenaje teniendo como alternativas su uso para efectos de alimentación animal, almacenamiento o como materia prima en la obtención de biogás. Para esto se pueden seguir las siguientes recomendaciones (COFEPRIS, 2009):

- Sangre fresca: Mezclar la sangre en recipientes limpios con salvado, cáscara de arroz, harina de yuca u otros granos en partes iguales y suministrar a porcinos y aves el mismo día de su preparación.
- Sangre con cal viva: Se añade 1% de cal viva al recipiente de la sangre poco a poco y se revuelve alcanzando así una vida de anaquel de hasta una semana; tiempo después del cual se puede aprovechar como sangre fresca.
- Sangre deshidratada: La sangre que ha sido mezclada con productos de origen vegetal se puede secar sobre una plataforma de ladrillo y cemento exponiéndose al sol, o, si se cuenta con equipos de secado, se puede hacer uso de éstos. La sangre seca se recoge en contenedores o bolsas de plástico para su aprovechamiento por otras vías.
- Sangre cocinada: La sangre se puede cocinar, para su aprovechamiento en alimentación animal, o como un paso para su deshidratación, esta debe someterse a una temperatura de 80°C por un lapso de tiempo de 15 a 20 minutos.
- Sangre cocinada y deshidratada: Después de cocinar la sangre, ésta se introduce en un saco poroso y se presiona para facilitar la expulsión del suero, posteriormente se siguen los pasos para su deshidratación, con este



procedimiento es posible almacenarla por un lapso de hasta un mes para, posteriormente, utilizarse como una rica fuente de proteína en la producción animal.

Las heces y los residuos de alimentos, se pueden aprovechar mezclándolos con desechos de la agricultura como el forraje, a fin de utilizarlos como abono para mejorar la calidad nutritiva del suelo en la siembra, o como fuente bacteriana para la obtención de biogás por vía anaerobia.

El contenido gástrico así como la grasa y pedacería pueden ser usados como fertilizantes naturales con el objeto de favorecer el crecimiento vegetal en prácticas de agricultura, además de ser posible su aprovechamiento como sustrato en el proceso de degradación anaerobia.

En el caso de cuernos, pezuñas, cerdas y demás desechos no comestibles, es recomendable trasladarlos a plantas de rendimiento o utilizarlos como relleno sanitario, estos procedimientos se explican en el inciso 2.4.

Por otra parte, los órganos decomisados, así como los animales muertos, deben ser incinerados, encalados y enterrados para evitar que estos desechos se conviertan en foco de contaminación para el rastro y sus alrededores.

Por si fuera poco, las aguas residuales provenientes de rastros tienen un gran impacto en la contaminación de aguas superficiales en los alrededores de los rastros. Las aguas residuales acaban con el oxígeno disuelto, aumentan en gran medida la turbidez del agua por la gran concentración de contaminantes orgánicos, lo cual impide la subsistencia de especies acuáticas en la zona, además de contaminar el agua potable.

Actualmente, es muy reducido el número de rastros que tratan las aguas de desecho. Un ejemplo es en el caso del rastro municipal de Ciudad del Carmen en Campeche, México, donde los efluentes de desecho son aprovechados primeramente para la obtención de biogás por medio de un proceso de biodigestión (AITA, 2009).

## **2.4 Tratamiento de residuos**

En México únicamente 154 de los 1,231 rastros que existen cuentan con la certificación TIF (PyMES, 2009), siendo éstos los únicos rastros que cuentan con sistemas de tratamiento de residuos en nuestro país. Lo cual representa un porcentaje de tratamiento de residuos estimado del 13%, mientras que en la Unión Europea de las 400,000 toneladas de desechos generados en los mataderos cada día se tratan cerca del 50%; aunque actualmente se pretende modificar ciertas legislaciones que permitan aumentar este volumen de tratamiento en dicho continente (Mata Álvarez y col., 2000).

Existen diferentes métodos de aprovechamiento de residuos en rastros, los cuales se explican a continuación:

### **❖ Compostaje**

Es un proceso bioquímico aerobio mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable permitiendo obtener así la composta o humus, a este proceso se le conoce como humificación (INFOAGRO, 2009). Dicha composta se utiliza como fertilizante y es considerada una fuente nutritiva para el suelo (de Bertoldi y

col., 1983; Senesi, 1989), pues además de mejorar su estructura, reduce su erosión ayudando a la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas. Aunque como se muestra en la Tabla 2.3, genera ciertas emisiones, las cuales deben ser controladas, para evitar que sean lanzadas a la atmósfera.

**Tabla 2.3 Emisión de compuestos volátiles durante el composteo aerobio expresado en gramos por tonelada (g/Ton) de desperdicio en rastros (Mata-Álvarez y col., 2000).**

Compuestos	Tratamiento aerobico	Maduración después del tratamiento anaerobio	Proporción aerobico/anaerobico
Alcoholes	283.6	0.033	8593.9
Cetonas	150.4	0.466	322.7
Terpenos	82.4	2.2	37.5
Esteres	52.7	0.003	17566.7
Sulfuros orgánicos	9.3	0.202	46.0
Aldehidos	7.5	0.086	87.2
Éteres	2.6	0.027	96.3
Total de compuestos orgánicos volátiles	588.5	3.017	195.1
NH <sub>3</sub>	158.9	97.6	1.6
Total	747.4	100.617	7.4

Existen dos técnicas de compostaje accesibles y de bajo costo para ser empleadas en rastros, conocidas como pila de residuos y compostero.

- Pila de Residuos: Los residuos del rastro se deben acumular en pilas alternando capas de contenido gástrico ruminal y heces con capas de grasa y pedacería alcanzando una altura de hasta 1.5 metros. Los residuos pueden apilarse en el suelo, aunque es recomendable poner una capa de asiento de 15 centímetros de tallos de maíz, paja, ramas y demás para proporcionar una ventilación adecuada.

Las heces y el contenido gástrico ruminal proveen humedad suficiente para iniciar la actividad bacteriana, por lo que al inicio, no es necesario añadir agua siendo necesaria su presencia, al observar falta de humedad y al momento de revolver la composta. La estructura de la pila debe ser lo más uniforme posible como se muestra en la Figura 2.3, a fin de evitar derrames o suciedad.

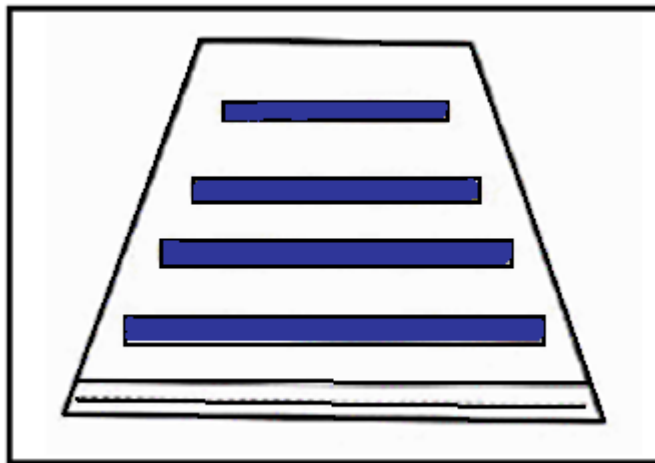


Figura 2.3 Pila de Residuos (COFEPRIS, 2009)

- Compostero: El tamaño del compostero dependerá de la cantidad de residuos a convertir, consiste en delimitar un área asignada para el tratamiento de residuos, mediante la construcción de muros preferentemente de ladrillo, acomodados como se muestra en la Figura 2.4 con el objetivo de hacer más rápida y económica su construcción.

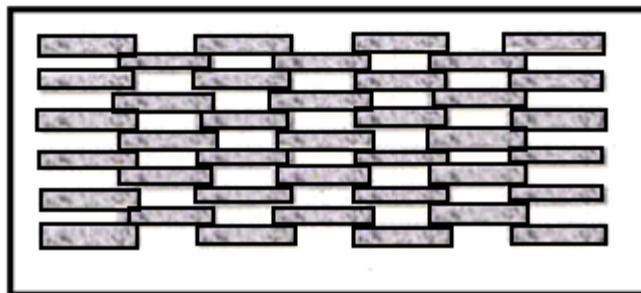


Figura 2.4 Estructura de ladrillos, muro de compostero (COFEPRIS,2009)

Una vez delimitada el área del compostero, se debe dividir en compartimentos como se muestra en la Figura 2.5 utilizando tablonces de madera, para llevar a cabo de manera ordenada y limpia el proceso de compostaje.

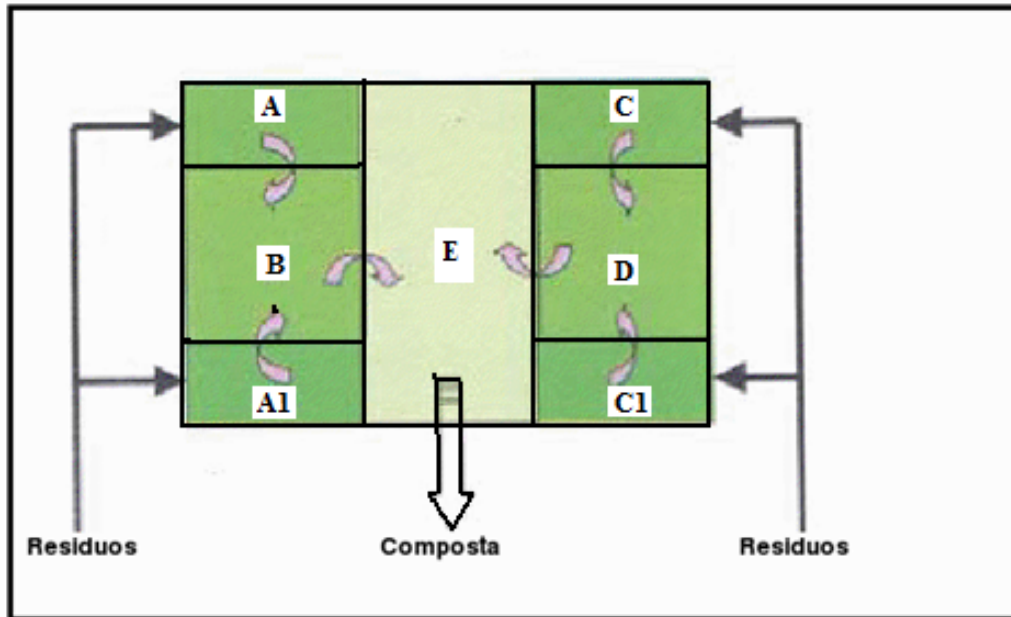


Figura 2.5 Diseño del Compostero (COFEPRIS, 2009)

Inicialmente, los residuos deben apilarse de manera similar a lo ilustrado en la Figura 2.3 en los compartimentos A y A1. Cuando estos se llenen, se procede a utilizar los compartimentos C y C1, siendo los compartimentos B y D un apoyo para llevar a cabo la mezcla de la composta y favorecer la conversión de todo el material de desecho, siendo el compartimento E, el sitio donde termina el proceso de compostaje y se obtiene el humus o composta para utilizarse como fertilizante.

## ❖ Digestión

El proceso de digestión se puede llevar a cabo de manera artificial en contenedores especiales adaptados para tal fin llamados digestores. El diseño de los mismos puede variar de acuerdo al proveedor del sistema y de las condiciones de cada rastro. Existen distintos tipos de digestores, aunque cumplen con dos requisitos principales. El primero es el que el gas es producido en uno o más digestores y almacenado en un tanque por separado. El segundo es el que el tanque de almacenamiento y el digestor conforman una sola unidad, donde el gas es producido en la parte baja de la estructura y es almacenado en la parte alta de la misma. Este último es más accesible económicamente, además de que su construcción no requiere un tiempo prolongado, aunque la producción de gas se ve afectada cuando se recarga el digestor. Mientras que el primero proporciona un abasto de gas continuo aunque los digestores sean recargados, por lo que es recomendable para rastros más grandes. En el inciso 2.11 se explican a detalle los diferentes tipos de reactores anaerobios.

## ❖ Planta de rendimiento

Una planta de rendimiento, es un lugar adaptado para procesar los desechos o decomisos que son aptos para consumo animal así como los subproductos provenientes de los rastros (CONASA, 2009).

La tecnología aplicada en estos centros, implica el empleo de un proceso de esterilización a elevadas temperaturas y presiones, que convierte el material tratado en

subproductos procesados que pueden incorporarse posteriormente a la alimentación animal, generalmente en forma de harinas.

Las plantas de rendimiento pueden o no estar integradas a los establecimientos TIF. Debido a que son instalaciones con altos costos de operación y mantenimiento, los establecimientos que procesan pequeños volúmenes, tienden a contratar los servicios de una empresa dedicada a procesar los desechos y decomisos u órganos decomisados.

La disposición de los decomisos por medio de plantas de rendimiento, es un requisito obligatorio que deben cumplir las plantas TIF, siendo este hecho otra de las garantías de higiene y sanidad que ofrece esta industria a los consumidores.

### ❖ **Relleno sanitario**

Un relleno sanitario es un espacio en el que se vierten y compactan los residuos sólidos. La diferencia que existe entre éste y un tiradero es que el primero cuenta con una membrana que protege al suelo contra las filtraciones de los líquidos de la basura o lixiviados para evitar que éstos alcancen cuerpos de agua (COFEPRIS, 2009).

En nuestro país la forma más común de disponer de los residuos sólidos son los tiraderos. Controlados o no, éstos representan un grave riesgo tanto al ambiente como a la salud pública ya que contaminan los mantos freáticos, generan malos olores, emiten gases de efecto invernadero y atraen a fauna nociva.

En un relleno sanitario se controlan todos los impactos antes mencionados e incluso se puede generar energía eléctrica a través del gas metano o biogás que se produce. Tal es el caso del relleno sanitario de Monterrey en donde se aprovecha el biogás producido por la basura para generar 7.4 megawatts que se usan para el alumbrado público y el bombeo de agua potable de la ciudad. Ésta debe ser siempre la última opción para el manejo de residuos debido a que la mayoría de ellos puede ser reciclada o reutilizada.

### ❖ **Incineración**

La incineración es una técnica de destrucción térmica que forma parte de los métodos más efectivos para destruir agentes potencialmente infecciosos (Salminen y Rintala, 2001a), es una opción costosa para el manejo de residuos, dado por el gasto calorífico, además de que representa un riesgo para la salud animal y humana por las emisiones de CO<sub>2</sub> que genera. Las ventajas de ésta opción a comparación de encalar y enterrar es que se requiere menos espacio y se puede recuperar el calor generado durante el proceso. Además de que se pueden utilizar biocombustibles sólidos que pueden ser obtenidos en el mismo rastro como parte del tratamiento de residuos. Como es el caso de los desechos de pollo secados al aire, que además de ser económicos tienen un valor calorífico de 13.5 GJ/Ton, siendo éste valor la mitad del generado por el carbón (Dagnall y Mann, 1993).

En éste proceso, los residuos son convertidos en gases que son liberados a la atmósfera y en cenizas que pueden enviarse a un relleno sanitario. La temperatura de incineración es alrededor de los 850°C en cámaras de combustión especializadas.



Debe verificarse que el proceso y equipo de incineración cumpla con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM) 098 sobre protección ambiental e incineración de residuos que establece los límites máximos permisibles de emisión de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y las especificaciones de operación del equipo utilizado para tal efecto (SEMARNAT, 2009).

#### ❖ **Encalar y enterrar**

Esta es una de las formas más comunes de manejo de animales muertos y de órganos decomisados. Además se considera la mejor forma de manejar éstos residuos en rastros pequeños. Sin embargo, la viabilidad de ésta forma de manejo depende de la cantidad de órganos decomisados, animales muertos y espacio disponible.

Los órganos decomisados y animales muertos deben enterrarse a una profundidad de al menos medio metro. Lo suficiente como para evitar que vectores como perros, roedores e insectos tengan acceso a los residuos. Asimismo, deben cubrirse con una capa delgada de cal que sirve como desinfectante. El agujero debe estar a una distancia de al menos 15 metros de algún pozo o cuerpo de agua y estar fuera de zonas propensas a inundaciones (COFEPRIS, 2009).

Los anteriores tratamientos, contribuyen en cierto modo al cambio climático, debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generan durante los mismos. La Tabla 2.4 muestra los factores de emisión para distintos tratamientos y sus combinaciones.

**Tabla 2.4. Factores de emisión para diferentes tratamientos (Mata-Álvarez, 2000).**

Tratamiento	Factor de emisión (Ton eq. CO <sub>2</sub> /Ton de residuo sólido)
Relleno sanitario	1.97
Incineración	1.67
Encalado + composteo + relleno	1.61
Encalado + composteo + incineración	1.41
Encalado + digestión sólida + relleno	1.42
Encalado + digestión líquida + incineración + relleno	1.19

## 2.5 Cambio Climático

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros climáticos: Temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc. Son debidos tanto a causas naturales (Crowley y North, 1988) como antropogénicas (Oreskes 2004).

Dentro de las causas naturales se encuentran las externas tales como las variaciones solares, variaciones orbitales, impacto de meteoritos y demás sucesos ocurridos fuera de la atmósfera terrestre y, las causas internas como la deriva continental, composición atmosférica, corrientes oceánicas y el campo magnético terrestre; siendo las causas internas las que ocurren dentro de la atmosfera terrestre. Las causas antropogénicas como su nombre lo indica, se deben específicamente a la actividad del hombre, la cual ha sido más intensa desde la deforestación de bosques para convertirlos en tierras de cultivo y como modo de expansión territorial debido al crecimiento en la población.

No obstante la mayor contribución del hombre en el cambio climático se debe al inicio de la revolución industrial, como se muestra en la Figura 2.6, desde la cual se han lanzado altas emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. Tal es el caso del CO<sub>2</sub> en fábricas y medios de transporte, y el metano en granjas de ganadería intensiva y mataderos.



Figura 2.6 Esquema simplificado de la historia y futuro de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Grobe y Graham, 2006).

La concentración de gas metano en la atmósfera se ve aumentada por los cultivos de arroz, las incineradoras de residuos y en gran medida por el pésimo tratamiento de residuos en los vertederos y la digestión de los animales de granja al criarlos masivamente para alimento en la actividad pecuaria. El inadecuado manejo del estiércol el cual, junto con los fertilizantes agrícolas, produce importantes cantidades de óxido nitroso, siendo este último utilizado como propelente para aerosoles en la fabricación de lámparas incandescentes y fluorescentes, además de tener un importante efecto invernadero.

La actividad ganadera específicamente, es una de las actividades con mayor impacto en el cambio climático actual, siendo responsable del 4% de las emisiones antropogénicas de gas metano (USDA, 2004). Hablando de manera general, esta actividad es responsable del 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo (FAO, 2009). La contribución de dicha actividad es dada por: Quema de combustibles fósiles utilizados en la producción y distribución de productos animales y fertilizantes, liberación de metano procedente de la descomposición de fertilizantes y del estiércol animal, cambios en el uso de la tierra para la expansión del pasto y cultivos forrajeros, así como la degradación de la tierra.

Las emisiones de metano procedentes del estiércol del ganado están influidas por diversos factores que afectan al crecimiento de las bacterias responsables de la formación de metano, entre los que cabe destacar la temperatura ambiental, la humedad, el tiempo de almacenamiento, y la dieta misma del ganado. Esta última al ser poco digerible aumenta la concentración de sólidos volátiles en el estiércol lo que incrementa el sustrato a partir del cual se produce el CH<sub>4</sub> (USDA, 2004).

Es importante mencionar que a pesar de que se lanza a la atmósfera una menor cantidad de gas metano que de CO<sub>2</sub> en desechos, el metano tiene un impacto 23 veces mayor en su contribución al efecto invernadero (IPCC, 2001) (Tabla 2.5). Lo anterior puede ser minimizado implementando biodigestores como sistemas de tratamiento de desechos en rastros, a fin de captar las emisiones de metano y canalizarlas hacia diferentes usos. Un ejemplo de esto, son las emisiones generadas por el manejo del

estiércol en rastros que alcanzan un total de 17.52 millones de toneladas de metano por año, mismas que pueden ser aprovechadas (Tabla 2.6).

**Tabla 2.5 Potencial de calentamiento global de diferentes gases de efecto invernadero (INE, 2009).**

Gases de efecto invernadero	Potencial de calentamiento global En un horizonte de 100 años CO <sub>2</sub> = 1
Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	23
Óxido Nitroso	296
Hexafluoruro de azufre	22,200
Hidrofluorocarbonos	120- 12,000
Perfluorocarbonos	5,700- 11,900

**Tabla 2.6 Emisiones globales de metano procedentes del manejo del estiércol (FAO, 2008).**

Emisiones ( millones de Ton de CH <sub>4</sub> por año y fuente)							
Región/país	Ganado bovino	Otro ganado	Ganado bufalino	Ganado caprino	Ganado Porcino	Ganado aviar	Total
África subsahariana	0.10	0.32	0.00	0.08	0.03	0.04	<b>0.57</b>
Asia*	0.31	0.08	0.09	0.03	0.50	0.13	<b>1.14</b>
India	0.20	0.34	0.19	0.04	0.17	0.01	<b>0.95</b>
China	0.08	0.11	0.05	0.05	3.43	0.14	<b>3.84</b>
América central y América del sur	0.10	0.36	0.00	0.02	0.74	0.19	<b>1.41</b>
Asia occidental y África del norte	0.06	0.09	0.01	0.05	0.00	0.11	<b>0.32</b>
América del norte	0.52	1.05	0.00	0.00	1.65	0.16	<b>3.39</b>
Europa occidental	1.16	1.29	0.00	0.02	1.52	0.09	<b>4.08</b>
Oceanía y Japón	0.08	0.11	0.00	0.03	0.10	0.03	<b>0.35</b>
Europa oriental y central	0.46	0.65	0.00	0.01	0.19	0.06	<b>1.38</b>
Otros países desarrollados	0.01	0.03	0.00	0.01	0.04	0.02	<b>0.11</b>
<b>Total</b>	<b>3.08</b>	<b>4.41</b>	<b>0.34</b>	<b>0.34</b>	<b>8.38</b>	<b>0.97</b>	<b>17.52</b>

## 2.6 Energías renovables

Son los distintos tipos de energía obtenida a partir de fuentes naturales que permiten su regeneración o que están disponibles en forma continua con respecto al periodo de vida de la raza humana en el planeta (CONAE, 2009).

La electricidad, calefacción o refrigeración generadas por las fuentes de energías renovables, repercuten en el aprovechamiento de los recursos naturales como el sol, el viento y los residuos agrícolas u orgánicos (GREENPEACE, 2009). Las fuentes de energía renovable son las siguientes:

- **Eólica:** La energía es obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores.

La energía eólica es un recurso abundante, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles. Sin embargo ésta es intermitente, ya que solo permite obtener energía en lugares o épocas del año en que se registran vientos favorables para tal efecto (WWEA, 2009).

- **Solar:** La energía se obtiene mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol. La radiación solar que alcanza la Tierra puede aprovecharse por medio de la obtención de energía térmica, a través de la absorción de la radiación por dispositivos ópticos o de otro tipo, o por la obtención de energía

eléctrica con paneles solares o fotovoltaicos, los cuales, al final de su vida útil suponen un residuo contaminante difícilmente reciclable al día de hoy (CIEMAT, 2009).

- **Geotérmica:** Es aquella energía que es obtenida mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, entre los que caben destacar el gradiente geotérmico y el calor radiogénico. Dicha energía se obtiene por extracción del calor interno de la Tierra, en áreas de aguas termales muy calientes a poca profundidad, donde se realizan perforaciones por fracturas naturales de las rocas basales o dentro de rocas de sedimentos. El agua caliente o el vapor pueden fluir naturalmente, por bombeo o por impulsos de flujos de agua y de vapor como los geiseres, como se muestra en la Figura 2.7. El método a elegir depende del que en cada caso sea económicamente rentable.

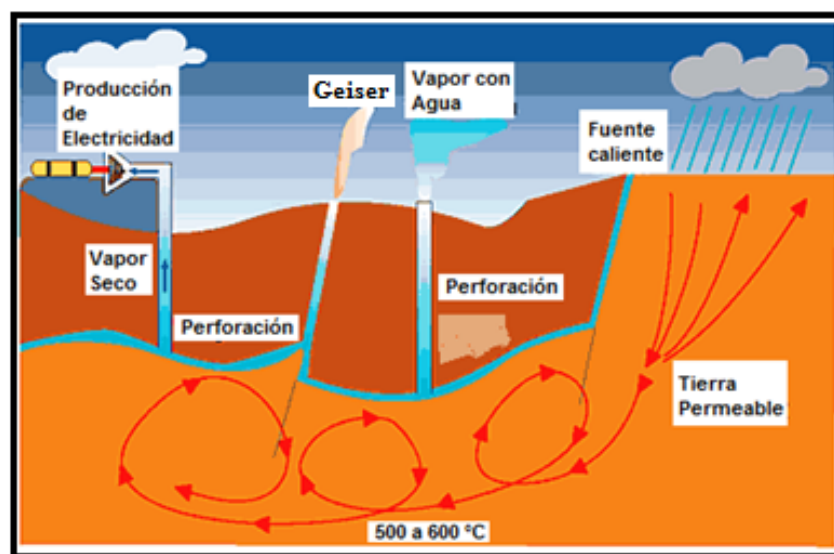


Figura 2.7 Geotérmica de alta energía (ENERGIE-GEOTHERMIQUE, 2009).

- **Hidráulica:** También llamada Hídrica, es aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente de ríos, cascadas o mareas. Se puede transformar a muy diferentes escalas, existiendo desde hace siglos pequeñas explotaciones en las que la corriente de un río mueve un rotor de palas y genera un movimiento aplicado, como en los molinos rurales. Sin embargo, la utilización más significativa la constituyen las centrales hidroeléctricas de represas.

Cuando el Sol calienta la Tierra, además de generar corrientes de aire, hace que el agua de los mares, principalmente, se evapore y ascienda por el aire y se mueva hacia las regiones montañosas, para luego caer en forma de lluvia. Esta agua se puede coleccionar y retener mediante presas. Parte del agua almacenada se deja salir para que se mueva los álabes de una turbina engranada con un generador de energía eléctrica como se muestra en la Figura 2.8.

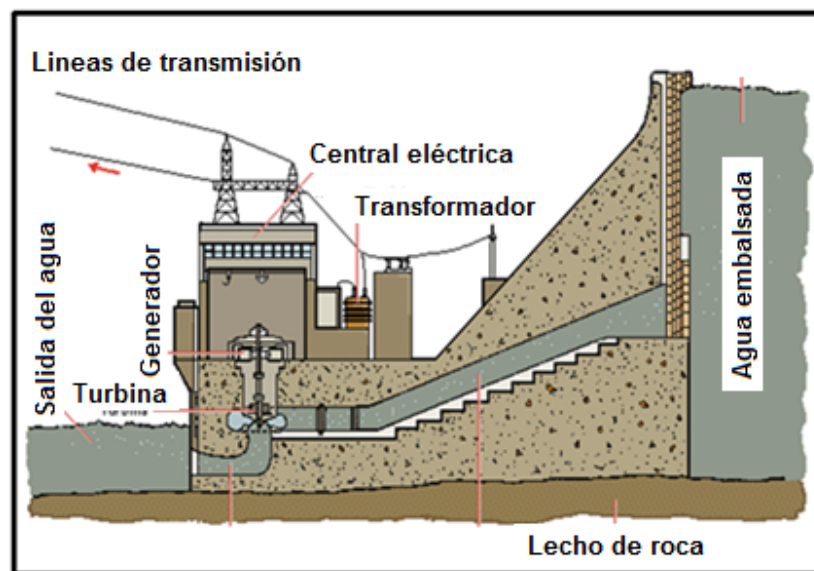


Figura 2.8 Central Hidroeléctrica (ENCARTA, 2009b).



- **Mareomotriz:** Es la energía que se obtiene a partir del aprovechamiento de las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa de la Tierra y la Luna, y que resulta de la atracción gravitatoria de esta última y del Sol sobre las masas de agua de los mares. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse interponiendo partes móviles al movimiento natural de ascenso o descenso de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable (PORTALENERGÍA, 2009).
- **Undimotriz:** Es la energía producida por el movimiento de las olas. Es menos conocida y extendida que la mareomotriz, aunque cada vez se aplica más. Algunos sistemas de aprovechamiento pueden ser:
  - ✓ Un aparato anclado al fondo con una boya unida a él por un cable. El movimiento de la boya se utiliza para mover un generador. Otra variante sería tener la maquinaria en tierra y las boyas metidas en un pozo comunicado con el mar.
  - ✓ Un pozo con la parte superior hermética y la inferior comunicada con el mar. En la parte superior hay una pequeña abertura por la que sale el aire expulsado por las olas. Este aire mueve una turbina que es la que genera la electricidad.

- ✓ Un aparato flotante de partes articuladas que obtiene energía del movimiento relativo entre sus partes como la que se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Convertidor de energía de olas "Pelamis" (PELAMISWAVE, 2009)

- **Azul:** Es la energía obtenida por la diferencia en la concentración de la sal entre el agua de mar y el agua de río con el uso de la electrodiálisis inversa u ósmosis con membranas de iones específicos. El residuo en este proceso es agua salobre la cual es aquella que tiene más sal disuelta que el agua dulce, pero menos que el agua de mar (entre 0.5 y 30 g de sal/L). En la Figura 2.10 se observa este proceso.

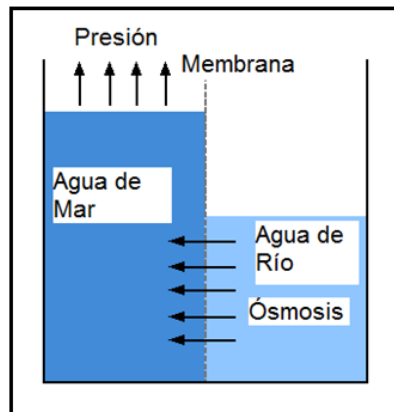


Figura 2.10 Mecanismo celda de energía azul (Arimasen, 2006)

- **Hidrógeno:** La energía se obtiene a partir de la electrólisis del agua la cual se lleva a cabo en celdas donde se separan los componentes del agua, siendo el hidrógeno el producto principal mediante el cual es posible obtener energía eléctrica, teniendo como subproductos vapor de agua y oxígeno.

El hidrógeno obtenido puede ser comprimido y almacenado en celdas por varios meses hasta que se lo necesite. El hidrógeno representa energía almacenada, se puede quemar como cualquier combustible para producir calor, impulsar un motor, o producir electricidad en una turbina (GREENPEACE, 2009).

- **Biomasa:** Se conoce como biomasa a toda materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

La biomasa proporciona energías sustitutivas a los combustibles fósiles, dadas por biocombustibles líquidos como el biodiésel o el bioetanol, gaseosos como el gas metano, o sólidos como la leña o materia orgánica deshidratada. Actualmente, la biomasa proporciona combustibles complementarios a los fósiles, ayudando al crecimiento del consumo mundial y de sus correspondientes impactos ambientales, sobre todo en el sector transporte (Estevan, 2008).

## 2.7 Biocombustibles

Son combustibles de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de residuos orgánicos. Dichos residuos orgánicos proceden habitualmente de desechos agrícolas, ganaderos, forestales, urbanos e industriales (BIODISOL, 2009). Su uso

genera una menor contaminación ambiental puesto que reducen el volumen total de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero que se emite en la atmósfera (Figura 2.11) ésto es debido a que lo absorben a medida que crecen y emiten prácticamente la misma cantidad que los combustibles convencionales cuando se queman, por lo que se produce un proceso de ciclo cerrado. Dichos biocombustibles son una excelente opción para sustituir a los combustibles fósiles tradicionales, como el carbón y petróleo, que debido a que son fuentes de energía no renovables, al agotarse sufren un alza en sus precios.

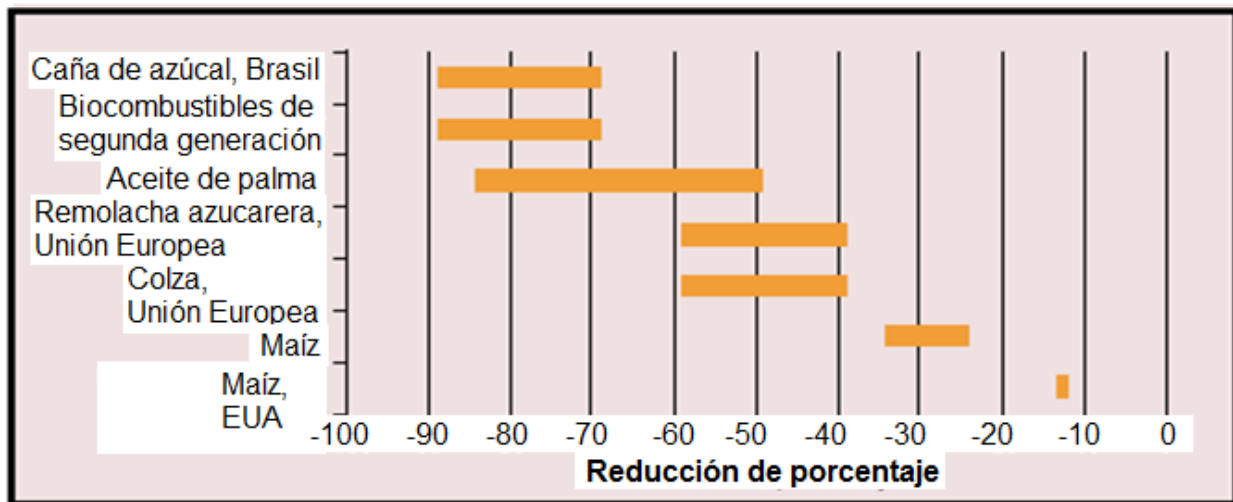


Figura 2.11 Reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero de determinados biocombustibles en comparación con combustibles fósiles (FAO, 2008)

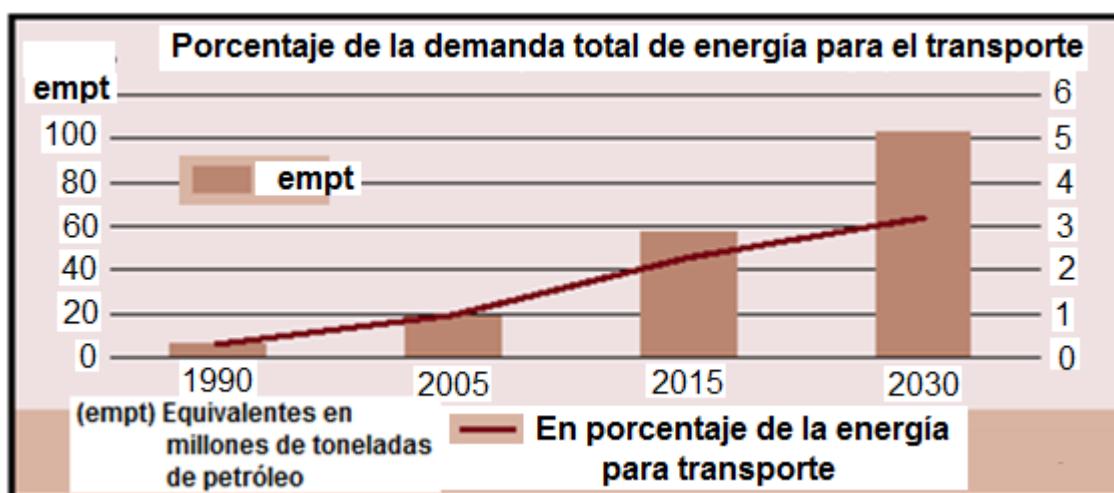
Los más desarrollados y usados son el bioetanol, que se obtiene a partir del maíz, sorgo, caña de azúcar y cereales tales como trigo y cebada. El biodiésel, se fabrica a través de aceites vegetales, que pueden o no haber sido utilizados con anterioridad, siendo los países con mayor producción Brasil, Canadá y China como se muestra en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7 Producción de biocombustibles en diferentes países (FAO, 2009)**

País/Grupo de países	Etanol		Biodiésel		Total	
	(Millones de litros)	empt*	Millones de litros	empt*	Millones de litros	empt*
<b>Brasil</b>	19,000	10.44	227	0.17	19,227	10.60
<b>Canadá</b>	1,000	0.55	97	0.07	1,097	0.62
<b>China</b>	1,840	1.01	114	0.08	1,954	1.09
<b>India</b>	400	0.22	45	0.03	445	0.25
<b>Indonesia</b>	0	0.00	409	0.30	409	0.30
<b>Malasia</b>	0	0.00	330	0.24	330	0.24
<b>Estados Unidos</b>	26,500	14.55	1,688	1.25	28,188	15.80
<b>Unión Europea</b>	2,253	1.24	6,109	4.52	8,361	5.76
<b>Otros</b>	1,017	0.56	1,186	0.88	2,203	1.44
<b>Mundo</b>	<b>52,009</b>	<b>28.57</b>	<b>10,204</b>	<b>7.56</b>	<b>62,213</b>	<b>36.12</b>

\*empt: Equivalentes en toneladas de petróleo

Uno de los sectores más beneficiados con el uso de los biocombustibles, es el del transporte, del cual se pronostica un mayor uso de los mismos a fin de controlar el cambio climático y como estrategia para mejorar la economía en este sector energético, en la Figura 2.12 se muestra una proyección para el uso de los biocombustibles en el transporte.



**Figura 2.12 Tendencias en el consumo de biocombustibles para el transporte (AIE, 2004)**

### **2.7.1 Biocombustibles Sólidos**

Son aquellos productos derivados de la biomasa sólida, que son susceptibles de utilización directa en los procesos de conversión energética y que se obtienen a partir de ciertas transformaciones, generalmente de naturaleza física, tales como el astillado, molienda y secado principalmente (UBA, 2009).

Los biocombustibles sólidos más importantes son:

- Paja de cereales
- Leñas
- Astillas
- Densificados (aglomerado y briquetas)
- Carbón vegetal
- Desechos de industrias alimenticias (cáscaras, restos de animales de sacrificio, huesos de aceituna, etc.)

### **2.7.2 Biocombustibles Líquidos**

Los biocombustibles líquidos se agrupan en bioalcoholes (bioetanol), biohidrocarburos, aceites y derivados (biodiésel), éstos son productos que se empiezan a utilizar como sustitutivos del gasóleo y la gasolina de los automóviles, también son conocidos con el nombre de biocarburantes.

El bioetanol o bioalcohol, es un alcohol producido por la fermentación de productos azucarados, como la caña de azúcar, o por los granos de cereales como el trigo, el maíz y la cebada. Se utiliza en vehículos como sustitutivo de la gasolina, ya sea en su totalidad o en mezclas, pues se sabe que más de 5.670 millones de litros de etanol se agregan anualmente a la gasolina para mejorar el rendimiento de los vehículos y reducir la contaminación atmosférica. El uso del etanol como único combustible debe realizarse en motores específicamente diseñados para dicho biocombustible.

El biodiésel, conocido como biogasóleo o diéster, se obtiene de aceites vegetales derivados de la soya, palma, el maíz, colza y grasas vegetales o animales. El biodiésel es un metiléster de los aceites vegetales obtenidos por reacción de los mismos con metanol, mediante una reacción de transesterificación, que produce glicerina como producto secundario.

El biodiésel se usa como aditivo del combustible en una mezcla del 20%, llamada B20, con diésel de petróleo en motores de ignición y compresión, este puede contribuir a ampliar el suministro de combustible diésel tanto como el etanol con respecto del suministro de gasolina.

El uso de biocombustibles líquidos, en lugar de combustibles fósiles conlleva grandes ventajas. Ésto es por la disminución de las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos de cadena corta producidas por los vehículos, y un gran ahorro, entre 25% y 80%, de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por los combustibles derivados del petróleo. Además proveen una alternativa de uso del suelo que evita los fenómenos de erosión y desertificación a los que quedan expuestas aquellas tierras agrícolas que, por

razones de mercado están siendo abandonadas por los agricultores ( Ambientum, 2009).

### 2.7.3 Biocombustibles gaseosos

Fundamentalmente existen tres: gasógeno, hidrógeno y biogás.

**-Gasógeno:** Es un combustible que se obtiene a partir de la gasificación, el cual es un proceso que permite obtener combustible gaseoso a partir de la combustión incompleta de biocombustibles sólidos como el carbón vegetal, la leña o casi cualquier residuo de biocombustibles sólidos, obteniéndose una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno la cual se utiliza como combustible para mover motores estacionarios como lo ilustra la Figura 2.13, ó ventiladores (FAO, 2009).



Figura 2.13 Tractor de Gasógeno (EXPOBIOENERGÍA, 2006)



**-Hidrógeno:** Siendo una fuente de energía potencialmente capaz de sustituir a los combustibles fósiles, el hidrógeno puede reducir en gran medida la emisión de gases de efecto invernadero. A diferencia del etanol producido a partir de cultivos agrícolas, su método de obtención bioquímica no implica entrar en competencia con la producción de alimentos, lo que lo hace una excelente alternativa energética. El hidrógeno no necesita las tierras agrícolas usadas por los cultivos alimenticios al obtenerlo como un subproducto del metabolismo de un tipo de algas en particular (Hawkes y col., 2002; Troshinaa y col., 2002).

La *Chlamydomona reinhardtii*, mostrada en la Figura 2.14, es un alga que se encuentra comúnmente en suelos húmedos, la cual, bajo condiciones anaerobias entra en un ciclo metabólico fermentativo en el cual se libera el hidrógeno a través de la acción de una enzima llamada hidrogenasa, misma que se activa mediante electrones generados por la descomposición de compuestos orgánicos o bien por la degradación química del agua a través de la fotosíntesis. Normalmente, sólo una pequeña fracción de los electrones interviene en la generación de hidrógeno.

Uno de los objetivos más importantes de la labor de investigación en este campo ha sido, en los últimos años, la detección y manipulación de rutas metabólicas que incrementen fracción de hidrógeno extraído, lo que aumentaría la producción potencial de hidrógeno, para finalmente orientarla hacia su uso como biocombustible e incorporarla a la vida cotidiana.



Figura 2.14 Algas *Chlamydomona reinhardtii* (SÓLOCIENCIA, 2009)

**-Biogás:** En general, se define al biogás como una mezcla de gases de composición variable según los parámetros de producción y la materia prima utilizada, la cual está constituida por metano ( $\text{CH}_4$ ) en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) principalmente. Aunque puede contener trazas de otros gases como hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

En la Tabla 2.8, se observa la composición del biogás obtenido a partir de los excrementos de animales.

Tabla 2.8 Composición de biogás (Prats, 1996).

Compuesto	%
$\text{CH}_4$	50-70
$\text{CO}_2$	30-50
$\text{H}_2\text{S}$	1
$\text{H}_2$	2

### 2.7.3.1 Costos

Los beneficios directos del uso de la digestión pueden ser estimados con base al uso del biogás, como una fuente alternativa a energías no renovables, y a la aplicación del efluente como una sustitución de nutrientes aportados por fertilizantes sintéticos (Meynell, 1982).

Un digester de tamaño promedio tiene un volumen total de 7.2 m<sup>3</sup>, con una fase líquida de 5.1 m<sup>3</sup> (75 % del total de la capacidad) y 1.8 m<sup>3</sup> para el almacenamiento del biogás (25 % del total de su capacidad). El digester de polietileno recibe una carga diaria de 21.6 kg de excrementos frescos mezclados con 86.4 kg de agua. Esto representa una carga anual de 7,885 kg de excrementos frescos y 31,536 kg de agua. Ocho cerdos adultos o una vaca lechera adulta pueden producir la cantidad necesaria por día (Botero y Preston, 1986).

Durante el proceso de degradación anaerobia en un reactor de polietileno, el carbono es el único elemento que es emitido en cantidades considerables bajo condiciones normales. Otros nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) se mantienen en iguales cantidades, pero salen en una mayor concentración en el efluente, puesto que el estiércol se digirió dentro del digester y se ha reducido su volumen (Hedlund y Xuan, 2000). Por tanto, la misma cantidad anual de macronutrientes que ingresa al sistema (36.5 kg N, 58.4 kg P y 55.2kg K) es la que sale del digester a través de su tubo de salida. La Figura 2.15 muestra el flujo de nutrientes para un digester de polietileno de las características descritas con anterioridad

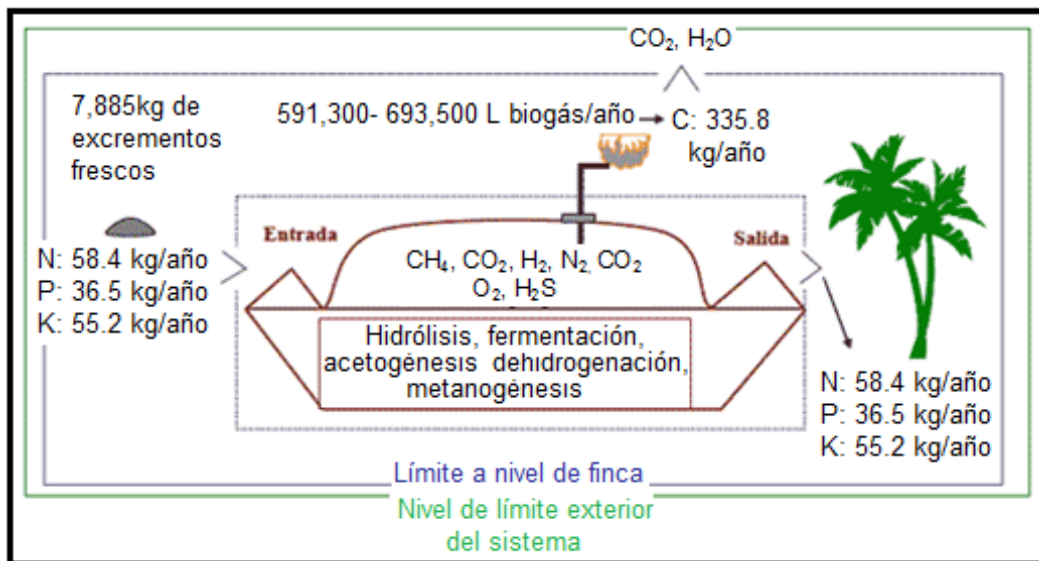


Figura 2.15 Análisis de ecosistema para un digestor de polietileno basado en 7885 kg de excrementos frescos (Hedlund y Xuan, 2000)

El valor comercial del biogás como fuente de energía se estima en su equivalente en valor energético del diésel, que es un combustible fósil que puede ser reemplazado por el uso de biogás. El valor neto en calorías de un metro cúbico (1000L) de biogás equivale a la energía emitida por la combustión de 0.55 litros de diésel (Sasse, 1988). De este modo, la producción anual de 693.50 m<sup>3</sup> de biogás (50 días de retención) equivale a 381.43L de diésel y 591.30 m<sup>3</sup> (40 días de retención) equivalen a 325.22L de diésel. El valor comercial de un litro de diésel en México es de USD 0.59. Calculando la cantidad de biogás por su equivalente energético en diésel por su valor comercial, los beneficios directos derivados de la combustión de biogás ascienden a un rango de entre USD 137 a USD 160.

Referente al valor económico del efluente, el precio por nutriente es calculado en base al valor comercial por kilo de cada nutriente de los fertilizantes sintéticos.

El valor económico anual del efluente se obtiene mediante el análisis del contenido nutricional del material, multiplicado por el precio comercial por kilo de nutrientes como N, P y K. Este valor se estima en USD 23 por la producción de 58.4 kg N, USD148 por la producción de 36.5 kg P y USD89 por el contenido de 55.2 kg de K, para un total de USD 260. Los principales beneficios directos derivados de la aplicación de la digestión a bajo costo se muestran en la Tabla 2.9 para el caso A con un tiempo de retención de 20 días, y para el caso B con un tiempo de retención de 50 días, dichos beneficios pueden incrementarse si el efluente se seca y se vende como fertilizante sólido a un precio mayor que el comercial.

**Tabla 2.9. Beneficios directos de un ejemplo de aplicación de un sistema de degradación anaerobia (Modificada de Aguilar y Botero, 2007)**

Beneficios	Valor	
	Caso A	Caso B
<b>A. Biogás como fuente de energía</b>		
a. Producción neta anual de biogás (m <sup>3</sup> /año)	693.50	591.30
b. Equivalente neto a la combustión de combustible fósil (litros de diésel)	381.43	325.22
c. Precio comercial por unidad de combustible fósil (USD/L)	0.59	0.59
d. Ahorro total anual por el uso de biogás (b x c) USD	255.04	191.88
<b>B. Efluente como fertilizante</b>		
g. Nitrógeno- USD	23.10	23.10
h. Fósforo- USD	148.40	148.40
i. Potasio- USD	88.75	88.75
k. Beneficios totales derivados del uso del efluente (g + h + i) USD	260.25	260.25
<b>C. Beneficios directos totales al año (d + k) USD</b>	<b>515.29</b>	<b>452.13</b>
Caso A. 20 días de tiempo de retención (Hendul y Xuan, 2000)		
Caso B. 50 días de tiempo de retención (Botero y Preston, 1986)		

### 2.7.3.2 Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

El Mecanismo de Desarrollo Limpio o Mecanismos para un Desarrollo Limpio (MDL) es un acuerdo suscrito en el Protocolo de Kyoto establecido en su artículo 12, que permite a los gobiernos de los países industrializados y a las empresas, suscribir acuerdos para cumplir con metas de reducción de gases de efecto invernadero. Así para el primer periodo de compromiso comprendido entre los años 2008- 2012, invirtiendo en proyectos de reducción de emisiones en países en vías de desarrollo como una alternativa para adquirir reducciones certificadas de emisiones (CERs) a menores costos que en sus mercados (SEMARNAT, 2009). Los pasos para formular e implementar un proyecto MDL se muestran en la Figura 2.16.

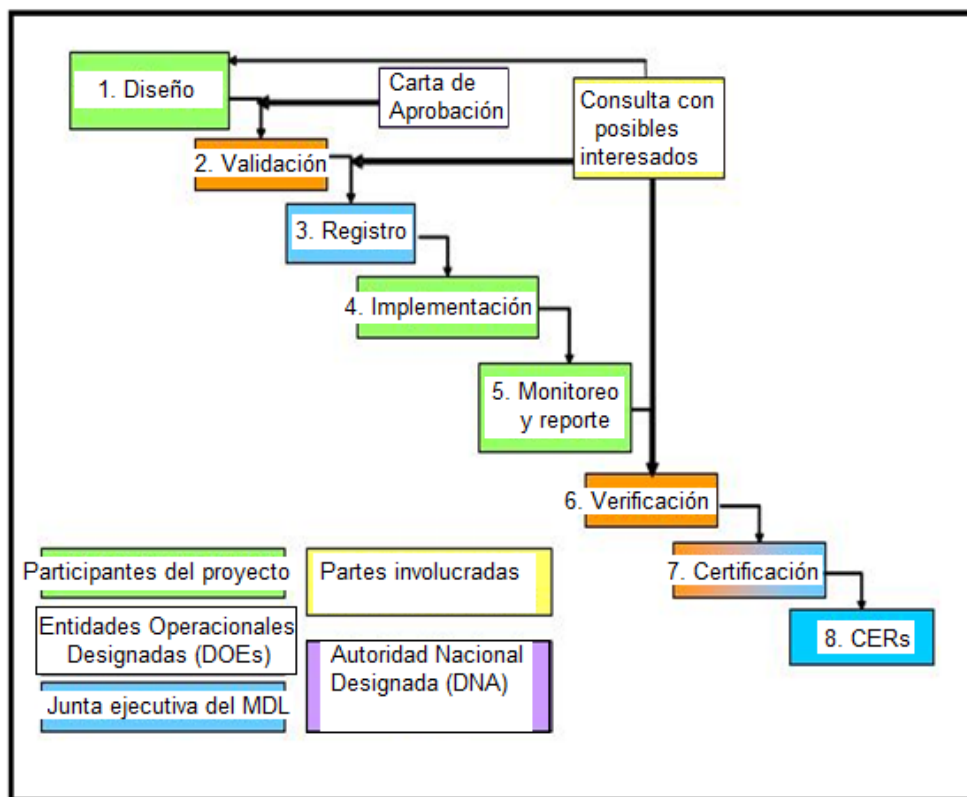


Figura 2.16 Diagrama de flujo para implementar un proyecto MDL (SEMARNAT, 2009)

## 2.8 Degradación anaerobia

La degradación anaerobia es una degradación de la materia orgánica que sucede en ausencia de oxígeno. Es decir, de manera anaerobia siendo esta un resultado de los procesos de digestión, asimilación y metabolización de compuestos orgánicos llevado a cabo por bacterias, hongos, protozoos y otros organismos orientados a la producción de gas metano (Salminen y Rintala, 2001a). Este proceso también llamado digestión, ocurre de manera natural en el fondo de lagos o pantanos, en suelos compactados y anegados, también se observa en lagunas de desecho creadas por el hombre así como en rellenos sanitarios (UNAM, 2009). El gas metano es un subproducto principal del metabolismo de bacterias metanogénicas, cuya clasificación se muestra en la Tabla 2.10, las cuales se hayan naturalmente en el tracto digestivo y por ende en el estiércol de ganado bovino y porcino, principalmente (ENCARTA, 2009a).

**Tabla 2.10 Especies y características de las bacterias metanogénicas (UPRM, 2009)**

Familia	Características
<i>Metanobacteriaceae</i>	Bacilos largos o cortos; utilizan H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> y algunas formato o alcoholes como sustratos para metanogénesis; cocos que utilizan H <sub>2</sub> o metanol, la mayoría son gran positivos; contienen pseudomureina; no móviles; contenido de Guanina y Citocina (GC), 33- 61%
<i>Metanotermaceae</i>	Bacilos; los sustratos para metanogénesis son H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> ; gran positivos; contienen pseudomureina; no móviles; termofílicos extremos; contenido de GC 33- 34%
<i>Metanococcaceae</i>	Cocos irregulares; los sustratos para metanogénesis son H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> y formato; gran negativos; móviles; contenido de GC 29- 34%
<i>Metanomicrobiaceae</i>	Bacilos, espirilos, placas o cocos irregulares; utilizan H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> ; algunos formato y alcoholes como sustratos para metanogénesis; gran negativos, móviles y no móviles; contenido de GC, 39- 61%
<i>Metanocorpusculaceae</i>	Pequeños, cocos irregulares; utilizan H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> y algunas formato y alcoholes como sustratos para metanogénesis; gran negativos; móviles y no móviles; contenido de GC 48- 52%
<i>Metanosarcinaceae</i>	Pseudosarcina, cocos irregulares; utilizan H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> , acetato, compuestos metílicos como sustratos para metanogénesis; nunca formato; cocos que utilizan sólo H <sub>2</sub> o metanol; la mayoría son gran positivos o negativos; frecuentemente no móviles; contenido de GC 36- 52%

Las variables que influyen en el proceso son las siguientes:

- **Temperatura:** Se lleva a cabo un proceso óptimo alrededor de los 35°C
- **Acidez:** Determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, el valor óptimo de pH oscila entre 6.6 y 7.6.
- **Contenido de sólidos:** Se opera en mejores condiciones con menos de un 10% de sólidos, por lo que se obtiene mayor cantidad de biogás al tener un alto contenido de humedad en el reactor.
- **Nutrientes:** Para su crecimiento, las bacterias requieren de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- **Inhibición:** La degradación anaerobia puede detenerse por la presencia de oxígeno, concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas.

El producto principal de la degradación anaerobia es el biogás, cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso. La cantidad de gas producido es muy variable, dependiendo de la materia prima, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 L/kg de materia orgánica degradable, medida como sólidos volátiles, obteniendo un contenido en metano estimado del 70%. La Figura 2.17 muestra los litros ( $\text{dm}^3$ ) de biogás acumulados por kg de sólidos volátiles para diferentes materias primas.

De igual modo, el efluente de dicha degradación está compuesto por diversos productos orgánicos e inorgánicos y se puede utilizar tanto en la fertilización de suelos, como en alimentación animal (Wagner y col., 2007).



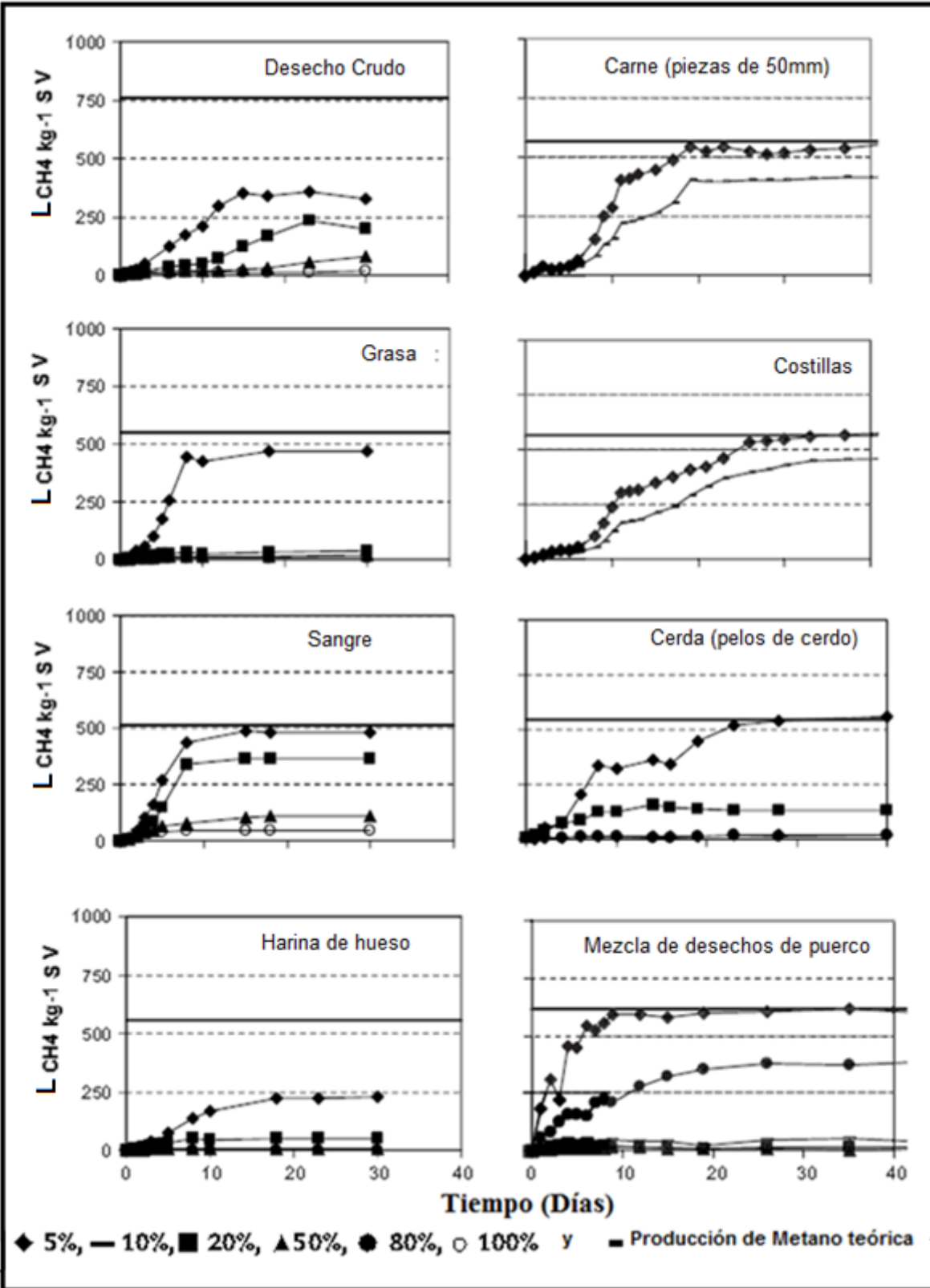


Figura 2.17 Producción de metano acumulada para distintos subproductos de cerdo en rastros, incubados a 55°C a diferentes diluciones (Hejnfelt y Angelidaki, 2009)

Las etapas de la degradación anaerobia, dependen de las bacterias que las constituyen, además de que el crecimiento de éstas está relacionado en función de la temperatura como se muestra en la Figura 2.18.

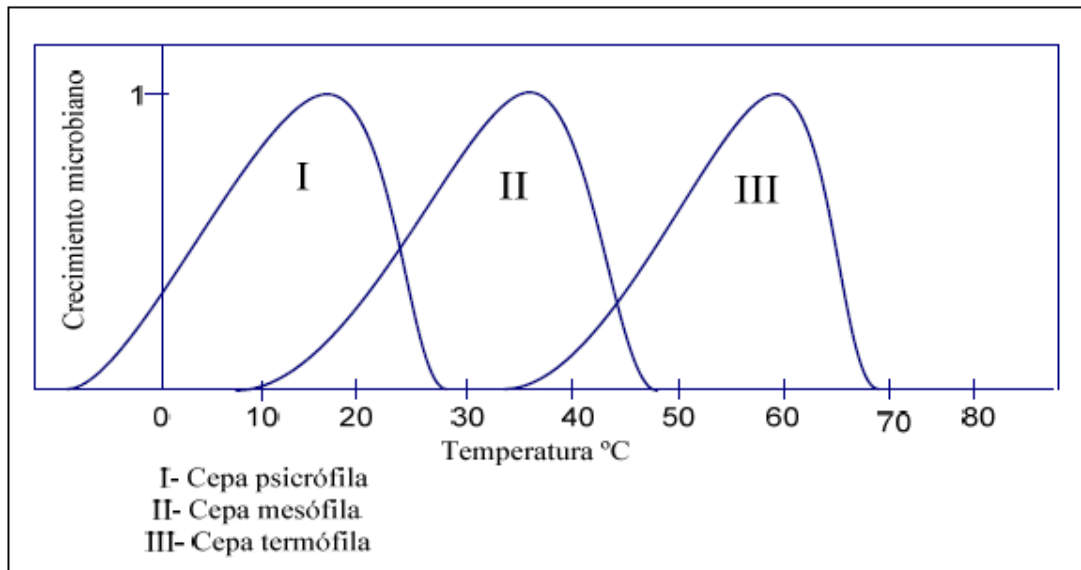


Figura 2.18 Crecimiento de bacterias (Castro- González y col., 1997)

Existen dos etapas cruciales las cuales se muestran en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Fases primordiales en la obtención de biogás (Montalvo y Guerrero, 2003)

Fase acidogénica	Fase metanogénica
Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno)	Bacterias anaerobias estrictas (no pueden vivir en presencia de oxígeno)
Reproducción muy rápida (alta tasa reproductiva)	Reproducción lenta (baja tasa reproductiva)
Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura.	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura
Principales metabolitos, ácidos orgánicos	Principales productos finales, metano y dióxido de carbono

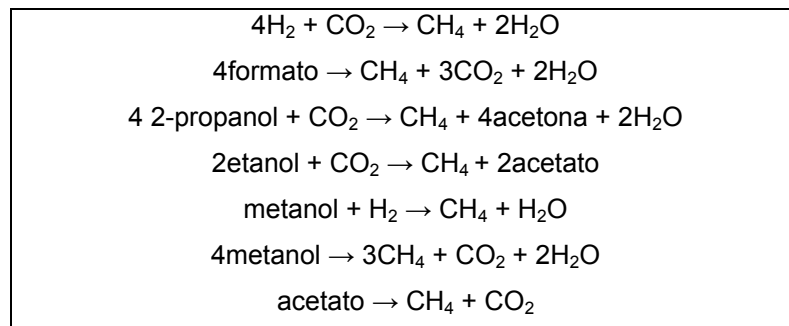
En la degradación anaerobia, comúnmente se parte de compuestos orgánicos o desechos ricos en grasas, carbohidratos y proteínas, por lo que éstos deben ser

degradados previamente en diferentes etapas para dar paso a las bacterias metanogénicas, dichas etapas se muestran a continuación:

- **Hidrólisis:** Rompimiento de polímeros complejos.
- **Acidogénesis:** Fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.
- **Acetogénesis:** Fermentación secundaria generando acetato, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>.
- **Metanogénesis:** Síntesis de metano a partir de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y acetato.

Las bacterias procariotas reductores de CO<sub>2</sub> más importantes en este proceso son las bacterias metanogénicas, son un grupo de arqueobacterias anaerobias estrictas que emplean generalmente el H<sub>2</sub> como donante de electrones. Hay por lo menos diez sustratos que se convierten en metano por la acción dichas bacterias. Todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, incluyendo formiato, acetato, metanol, metilmercaptano y metilamina. En la Tabla 2.12 se muestran algunas de estas reacciones.

**Tabla 2.12 Reacciones propias de las bacterias metanogénicas (UPRM, 2009)**



A pesar de que la producción de metano está muy extendida, son pocos los compuestos de carbono que sirven como precursores directos de la metanogénesis.

Por ello, es un proceso que depende de la producción de esos compuestos por otros organismos, a partir de la materia orgánica compleja como se muestra en la Figura 2.19.

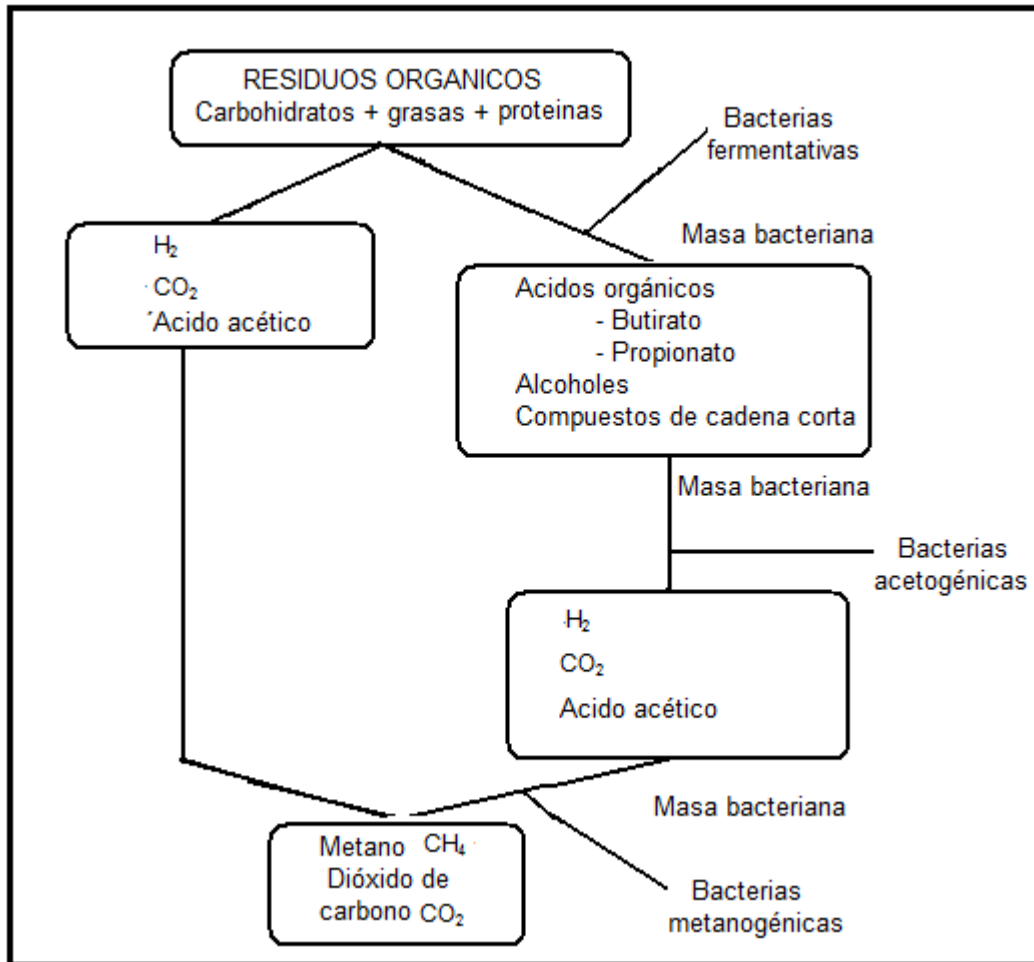


Figura 2.19 Etapas Involucradas en la obtención de biogás (Montalvo y Guerrero, 2003)

En muchos ambientes reductores los precursores inmediatos del metano son el  $H_2$  y el  $CO_2$  que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido, como la celulosa, pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos de procariontes. Ciertas bacterias rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa y glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la

glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas y las acetogénicas o las reductoras de sulfato si éste se halla en alta concentración con lo que se obtiene el biogás.

## 2.9 Biogás

El biogás se puede generar por medios naturales o en dispositivos específicos para tal efecto llamados biodigestores, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas) y otros factores en condiciones anaerobias (Jiménez y Martínez, 1995). Se utilizan diferentes residuos orgánicos, los cuales están constituidos por lípidos, carbohidratos y proteínas en diferentes proporciones, por lo que la cantidad obtenida de biogás será variable. En la Tabla 2.13, se observa la producción específica de biogás.

**Tabla 2.13 Producción específica de biogás (Sánchez, 2003)**

Residuo orgánico	Producción específica De biogás (L/kg)	Contenido proporcional en el biogás (%)	
		CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Carbohidratos	790	50	50
Lípidos	1,250	68	32
Proteínas	700	71	29

Su composición aunque es variable es rica en gas metano, el cual siempre es el componente principal como se menciona en la Tabla 2.8.

La producción de biogás, por degradación anaerobia, mostrada en la Figura 2.20, es un método útil para tratar los residuos biodegradables provenientes de rastros, fruta, etc.,

ya que produce un combustible de gran valor económico, además de generar un efluente que puede aplicarse como abono o acondicionador de suelo.

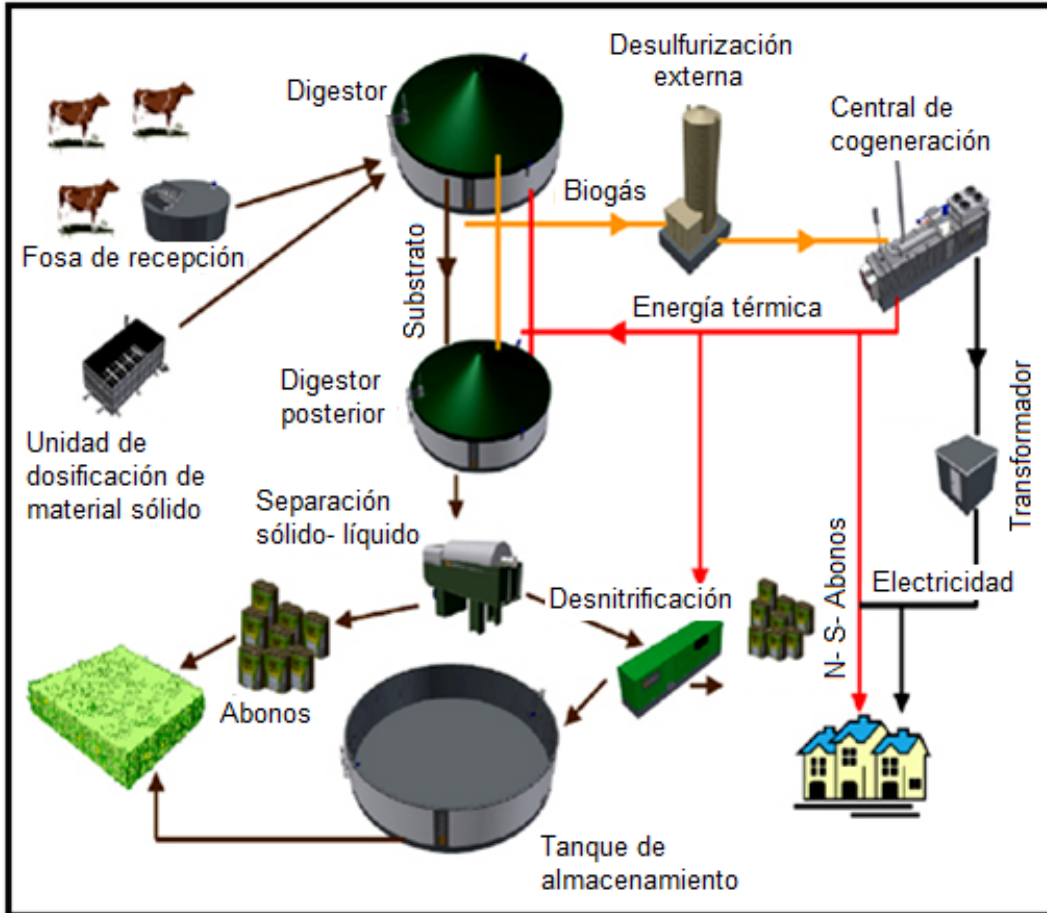


Figura 2.20 Esquema de la generación de biogás y su utilización (CONSTRUIBLE, 2008)

La cantidad producida de biogás es variable dependiendo de la fuente de obtención. En la Tabla 2.14, se muestra la cantidad obtenida de biogás para distintas fuentes.

Tabla 2.14 Obtención de biogás por distintas fuentes (Mata Álvarez, 2000)

Fuente	Hoy en día ( $10^6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$ )	Potencial estimado ( $10^6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{día}$ )
Lodos de aguas residuales	1.7	4
Desechos orgánicos	4.5	15
Agua de desecho industrial	0.8	3
Desechos de animales	0.5	10
<b>Total</b>	<b>7.5</b>	<b>32</b>

El biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 5,500 a 8,500 Kcal/m<sup>3</sup>, el cual puede ser comparado con otros combustibles a fin de obtener una equivalencia, como se muestra en la Tabla 2.15.

**Tabla 2.15 Equivalencia del biogás con otros combustibles (Lemme, 1985)**

<b>Biogás*</b>	<b>Estado bruto 5,500 kcal/m<sup>3</sup></b>	<b>Depurado 8,500kcal/m<sup>3</sup></b>
<b>Nafta</b>	0.730	1,100L
<b>Alcohol</b>	1.1L	1,700L
<b>Gasoil</b>	0.65L	1,000L
<b>Gas natural</b>	0.620L	0.950L
<b>Carbón mineral</b>	0.82kg	1.250kg
<b>Carbón vegetal</b>	1.24kg	1.900kg

\*Desde el punto de vista calórico, un metro cubico de biogás en estado bruto o depurado el CO<sub>2</sub> expresa los valores indicados

Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas, u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptados para tal efecto, algunos de los cuales tienen el requerimiento de biogás mostrado en la Tabla 2.16.

**Tabla 2.16 Valores medios de consumo de biogás en artefactos (Lemme, 1985)**

<b>Artefacto</b>	<b>Consumo L/h</b>	<b>Consumo Kcal/h</b>
<b>Cocina de 1 hornilla</b>	120 a 135	660 a 748
<b>Heladera de 13 pies</b>	100 a 120	550 a 660
<b>Lámpara de mantilla</b>	87 a 96	47.8 a 52.8
<b>Termotanque de 110L</b>	250 a 300	137.5 a 165
<b>Estufa infrarroja de 110cal</b>	305 a 317	167.7 a 173.2
<b>Motor por 1hp/h</b>	500 a 800	2,750 a 4,400

Asimismo y de manera gráfica, se muestra el rendimiento de 1m<sup>3</sup> de biogás por tiempo para los mencionados artefactos en la Figura 2.21

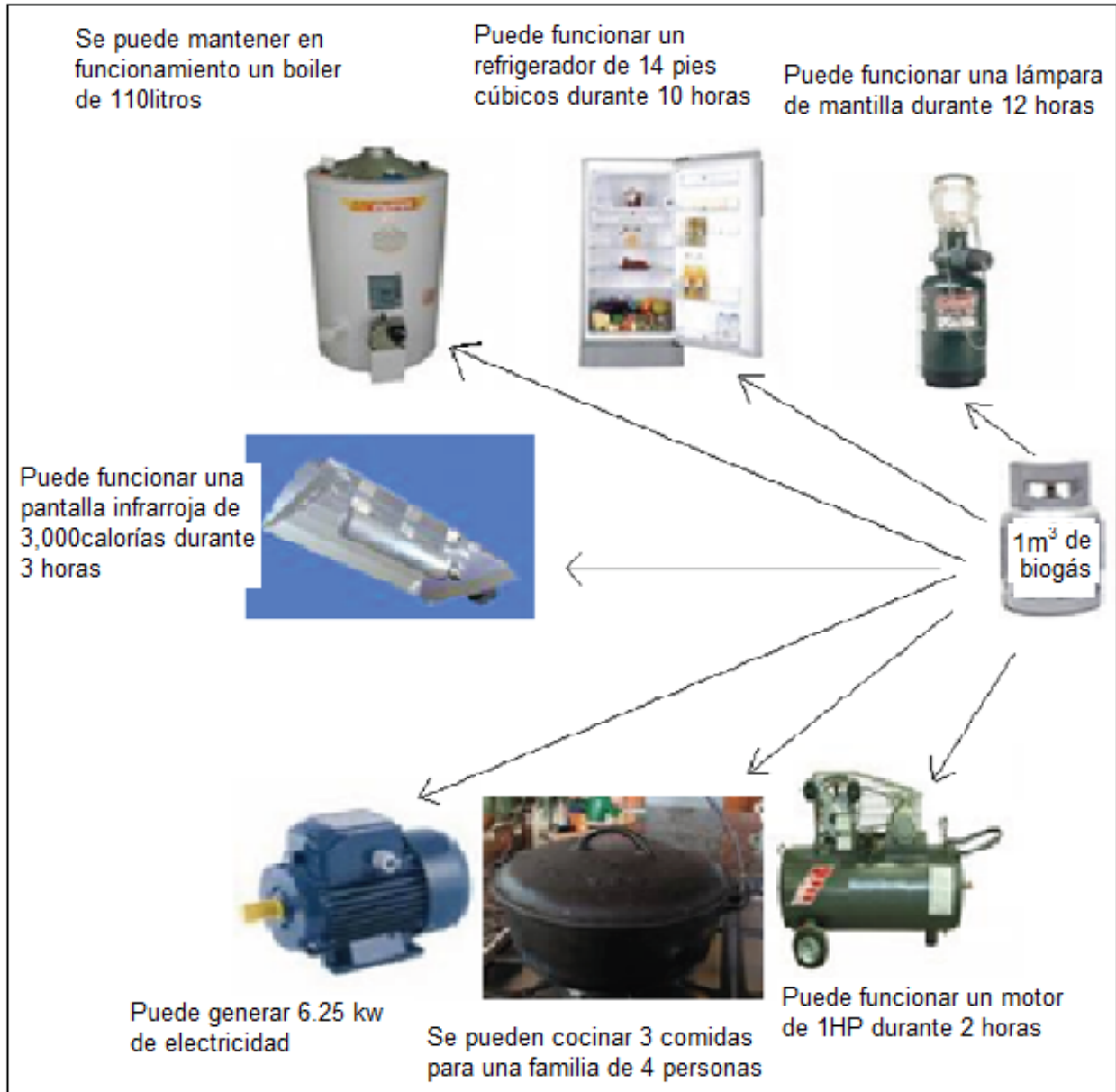


Figura 2.21 Alternativas de rendimiento de 1m<sup>3</sup> de biogás (Lemme, 1985)

## 2.10 Ecuaciones para la predicción de biogás en la degradación anaerobia

Cuando se pretende obtener biogás por la vía de la degradación anaerobia, es importante estimar que cantidad de este será obtenida por cierta cantidad de residuos orgánicos, con el objeto de tener la suficiente capacidad de almacenamiento o estimar



el ahorro energético inherente a su producción, por lo que su producción teórica depende de la ecuación 2.1:

$$P_{\text{biogás}} = t \times DM \times OM \times MBP \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde:

$P_{\text{biogás}}$  = Producción de biogás

t = Toneladas de sustrato o materia prima

DM = Porcentaje de materia seca en el sustrato

OM = Porcentaje de materia orgánica seca

ODM = DM x OM = Partícula orgánica del sustrato

MBP =  $\text{m}^3$  / Ton de ODM

La Ecuación 2.2., se utiliza cuando el biogás se obtiene a partir de dos o más sustratos:

$$P_{\text{biogás}} = \left[ M \times DM_M \times \frac{OM_M}{DM_{cs}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg } OM_M} \times 1000 \right] + \left[ CS \times DM \times \frac{OM_{cs}}{DM_{cs}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg } OM_{cs}} \times 1000 \right] \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde:

M = Ton desecho / año

DM = Porcentaje de materia seca

OM =  $\text{m}^3$  de biogás / kg de desecho

OM / DM = Proporción orgánica de materia seca

CS = Cantidad del otro sustrato

La productividad de metano, es uno de los parámetros que permite evaluar la eficiencia en la generación de gas metano (Sánchez y col., 2001). Se define como la cantidad de metano generado durante el tiempo de residencia, es decir, el tiempo en que la materia

a degradar permanece dentro del reactor. La ecuación utilizada para tal efecto es la Ecuación 2.3:

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} \times t} \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde:

$V_{CH_4}$  = Volumen de metano generado

$V_{reactor}$  = Volumen de materia a degradar dispuesta en el reactor

t = Tiempo de residencia

En la producción anaerobia de gas metano, la materia prima empleada limita la cantidad de gas metano obtenido, por lo que existe una producción de metano máxima dependiendo de la naturaleza del sustrato, lo cual se refleja en la Ecuación 2.4.:

$$M_{Máx} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org \text{ total}}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde:

$M_{Máx}$  = Cantida máxima de metano obtenible

$V_{CH_4}$  = Volumen de metano generado

$S_{org \text{ total}}$  = Cantidad de materia orgánica total utilizada en el proceso

### 2.11 Usos del lodo digerido

Una vez que la materia orgánica ha cumplido el tiempo de residencia dentro del reactor y ha generado su cantidad máxima de metano, debe ser removida para dar cabida a desechos o materia orgánica fresca o sin digerir y así continuar la producción de biogás. Por lo que la materia orgánica después de su degradación por la acción de

bacterias anaerobias recibe el nombre de lodo digerido (AEMA, 2010). El cual aún tiene una proporción de materia orgánica de entre 40 a 50%, con la cual no fue posible obtener biogás (Lenntech, 2009). El lodo digerido aunque constituye un amplio recurso potencial, se ve limitado en su aprovechamiento por las altas cantidades de contaminantes químicos y biológicos que contiene, aunque además de ser empleado como inóculo dentro del mismo proceso del que se obtuvo, puede tener distintas aplicaciones.

Una de estas aplicaciones, es la que se les da en la planta de tratamiento de Texcoco, donde se ha logrado una metodología para el uso y manejo de lodos, empleándolos como sustrato en la producción de especies forestales con el fin de abatir los volúmenes extraídos de tierra de monte lo que a largo plazo disminuirá la alteración de los bosques de donde se extrae.

Por otro lado, el composteo es una alternativa viable en el manejo de estos lodos, ya que es un proceso biológico que estabiliza sus componentes orgánicos bajo condiciones aerobias controladas para su disposición final. Aunque en este caso existen dos parámetros de riesgo que deben ser controlados: La cantidad de metales pesados y los microorganismos patógenos. Dichos parámetros son controlados de la siguiente manera (EPA, 1992):

- La temperatura en la composta, debe ser de 40°C por cinco días consecutivos o temperaturas mayores de 55°C por cuatro horas. Aunque en términos estrictos

se recomiendan 55°C por quince días en pilas aireadas por volteo aplicando cinco volteos, uno cada tres días.

- Se debe agregar material adicional además del lodo digerido a la composta. Éste debe ser fuente de carbono para los microorganismos degradadores de la materia orgánica, se debe incrementar la porosidad y el área de contacto del lodo expuesto al oxígeno atmosférico durante el composteo además de reducir la humedad de la composta por secado ó ventilación. Los materiales que se emplean son: Cortezas de madera, olotes o rastrojos de maíz, hojarasca, papel, cartón, cascarilla de cacahuete, desechos de madera, etc.

Los lodos digeridos se caracterizan por tener importantes cantidades de nitrógeno y fósforo como se muestra en la Tabla 2.17.

**Tabla 2.17 Características de los lodos (Carranza, 2008)**

<b>Sólidos Sedimentados (SS)</b>	<b>Lodos Primarios</b>	<b>Lodos secundarios</b>	<b>Lodos digeridos (mezcla)</b>
Sólidos sedimentados (SS) (%)	30- 36	18- 29	31- 40
Contenido de agua (%)	92- 96	97.5- 98	94- 97
Sólidos suspendidos volátiles (SSV) (%)	70- 80	80- 90	55- 65
Grasa (%SS)	12- 16	3- 5	4- 12
Proteínas (%SS)	4- 14	20- 30	10- 20
Carbohidratos (%SS)	8- 10	6- 8	5- 8
pH	5.5- 6.5	6.5- 7.5	6.8- 7.6
Fósforo (P) (%SS)	0.5- 1.5	1.5- 2.5	0.5- 1.5
Nitrógeno (N) (%SS)	2- 5	1-6	3- 7
Bacterias patógenas (N° / 100mL)	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup>	100- 100	10- 100
Organismos parásitos (N° / 100mL)	8- 12	1-30	1-3
Metales pesados (%SS) (Zn, Pb, Cu)	0.2- 2	0.2- 2	0.2- 2

Debido a las características anteriores, los lodos digeridos se utilizan como fertilizantes, abono, mejoradores de suelo o como complemento en la fertilización. El valor fertilizante de los lodos está dado en función de su capacidad de mineralización, un lodo que se mineraliza lentamente, será mejor que uno que lo hace rápidamente. Debido a que este último libera sus elementos nutritivos sin formar costra o capa la cual sirve para mantener el equilibrio mineral en el suelo. La presencia de fósforo permite dar altos rendimientos en los cultivos, está considerado como un elemento nutritivo mayor y su disponibilidad depende de las condiciones del suelo. Por lo que al estar ausente, debe ser suministrado en los fertilizantes ya que interviene en la formación de raíces y floración de los vegetales (López, 2000).

## **2.12 Tipos de reactores anaerobios**

Los reactores anaerobios son comúnmente llamados digestores o biodigestores. Son tanques o recipientes cerrados que pueden ser construidos con diversos materiales como ladrillos, cemento, metal o plástico. La mayoría son de forma cilíndrica, y poseen un ducto de entrada por el cual se suministra la materia a degradar, ya sea desechos de rastros, estiércol, desperdicios de frutas y verduras, etc., y un ducto de salida en el cual se evacua el lodo digerido. Los materiales que ingresan y abandonan el reactor se llaman influente y efluente respectivamente. El proceso de degradación anaerobia, ocurre dentro de estos reactores, liberando la energía química contenida en la materia prima, la cual se convierte en biogás (Castellanos, 1980).

Existen diferentes tipos de reactores anaerobios, los cuales se pueden clasificar dependiendo de aspectos como el tiempo de retención de las fracciones sólidas, líquidas y de microorganismo, TRS o tiempo de retención de sólidos y líquidos, TRH o tiempo de retención hidráulico y TRM o tiempo de retención de microorganismos, dependiendo de dichos aspectos, pueden distinguirse tres tipos primordiales de biodigestores o reactores anaerobios (Alonso, 1996). En la Tabla 2.18 se observa la clasificación para los distintos tipos de reactores anaerobios.

- Tipo A: Son aquellos donde los TRH, TRS y TRM son de igual magnitud
- Tipo B: El TRH es menor que los TRS y TRM
- Tipo C: Los TRS y TRH son menores que el TRM

**Tabla 2.18 Clasificación de reactores anaerobios de acuerdo al TRH, TRS y TRM (Alonso, 1996)**

Categoría	Comparación entre los TRS, TRH y TRM	Tipos de reactores anaerobios
<b>A</b>	TRH = TRS = TRM	Intermitente o por lote, continuamente agitados, flujo-tapón
<b>B</b>	TRM y TRS > TRH	Continuamente agitados con recirculación de sólidos, flujo ascendente, flujo deflector
<b>C</b>	TRM > TRS y TRH	Filtros anaerobios, de lecho fluidizado o expandido

Además de los tiempos de retención, los reactores se diferencian por la agitación en el proceso encontrando los siguientes tipos:

- **Reactor anaerobio intermitente o por lotes:** Es el sistema más simple, ya que la operación involucra cargar una sola vez el influente al digestor y mantenerla

ahí durante un tiempo de entre 30 y 180 días. Durante ese tiempo, la producción de biogás alcanza un máximo y posteriormente disminuye hasta los valores mínimos. La degradación puede realizarse con bajos contenidos de sólidos (6 a 10 %) o a concentraciones mayores al 20%, en cuyo caso recibe el nombre de digestión o fermentación seca (Alonso, 1996).

En este tipo de reactores, los tiempos de retención son los mismos ya que la materia orgánica es retenida durante todo el tiempo de la degradación, lo que supone un proceso no continuo que es favorable cuando la disposición de residuos orgánicos es temporal. Este tipo de reactores anaerobios, representa una opción económica y muy viable dado que se obtienen cantidades de biogás competitivas, comparadas con las de otros tipos de reactores (Alcalde, 2009).

- **Reactor anaerobio continuamente agitado:** Es muy similar al reactor por lotes, aunque en este existe una agitación continua que puede ser proporcionada por una turbina o un motor de volteo, con el objeto de homogenizar la mezcla, liberar el biogás formado en capas internas y aumentar la velocidad de reacción.
- **Reactor anaerobio de flujo-tapón (salchicha):** Este tipo de biodigestores se construyen generalmente en surcos o fosas de tierra poco profundos y alargados y cuyas secciones transversales pueden ser circulares, cuadradas o en forma de "V". Se opera en forma semicontinua, entrando el influente por un extremo y saliendo el efluente por el extremo opuesto. El largo debe ser considerablemente mas grande que el ancho y la profundidad. La relación ancho-largo puede ser

5:1 o hasta 8:1 y son recomendables para trabajar con volúmenes mayores de  $15\text{m}^3$  y para residuos animales que no han sido procesados (Mandujano, 1981). Las condiciones ideales para este reactor, implican que las proporciones líquidas, sólidas y de microorganismos entren y salgan del digestor a tiempos y cantidades semejantes. Por otro lado, aunque puede o no haber un sistema de mezclado en el reactor, se lleva a cabo un mezclado vertical por efectos de la gravedad a todo lo largo, ya que debe existir una pendiente del 2%. En la Figura 2.22, se muestra un reactor de este tipo.



Figura 2.22 Digestor de flujo-tapón o salchicha (Reciclable, 2009)

- **Reactor anaerobio continuamente agitado con recirculación de sólidos:**  
Este reactor consiste en un tanque donde hay un flujo continuo de material y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado. La agitación



del contenido es esencial, debido a que el flujo interior debe estar en constante circulación y así producir una mezcla uniforme. Puede ser con un dispositivo separador, cuando se toma parte de la corriente de salida y se llevan directamente a la entrada del reactor o sin dispositivo separador, cuando en la salida del reactor existe un dispositivo separador que hace que se separen los sólidos y los productos de la degradación anaerobia, luego los sólidos se introducen de nuevo al reactor (Alonso, 1996).

- **Reactor anaerobio de flujo ascendente:** Es particularmente para residuos solubles con bajo contenido de sólidos. Consiste en un tanque cilíndrico que proporciona una distribución homogénea del agua residual que entra por una base cónica. El líquido fluye hacia arriba a través de un lecho de bacterias sedimentadas y de una región del digestor en la que las bacterias que se flocculan se sedimentan en aglomerados de 4mm de diámetro. Los residuos tratados llegan a un área más estable libre de burbujas en la que se sedimentan las bacterias que se separaron de la capa, obteniéndose de este modo TRS y TRM mayores que el TRH (Alcalde, 2009).
- **Reactor anaerobio de flujo deflector:** En este tipo de reactores se utilizan deflectores en el cuerpo interno del mismo, que en conjunto con una agitación moderada, facilitan la liberación del biogás.
- **Reactor de filtros anaerobios:** Está constituido por un tanque cilíndrico en cuyo interior existe un filtro de algún material seleccionado previamente como plástico

o ladrillo. Los microorganismos se adhieren en forma de película al filtro poroso y toman nutrientes del influente. Se ha observado que en el interior las poblaciones bacterianas tienden a separarse. Un ejemplo de esto es que las bacterias acidogénicas actúan en la base del digestor mientras que las bacterias metanogénicas se han encontrado alojadas en el filtro o en los lugares más alejados del influente (Alonso, 1996).

- **Reactor anaerobio de lecho fluidizado o expandido:** Se utiliza para reacciones donde intervengan un sólido y un fluido. En estos reactores la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas, con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura evitando la formación de zonas calientes.
- **Reactores anaerobios de tasa baja, tasa alta y combinados:** Los reactores de tasa baja son los convencionales, donde el lodo se efectúa en una sola fase, el espesamiento del lodo y la formación del sobrenadante se efectúan simultáneamente. En un proceso de fase única, se añade el lodo crudo o materia prima en la zona en la que se está llevando a cabo la degradación anaerobia y formación de biogás. El lodo se calienta por un intercambiador de calor exterior. Cuando el biogás sube a la superficie, arrastra partículas de lodo y de otros materiales como grasas y aceites dando lugar a la formación de una capa de espuma. Los reactores de tasa alta tienen una cantidad de sólidos mayor, el lodo se mezcla con la recirculación del biogás, bombeo o mezcladores con tubos de

aspiración, calentándose para lograr altos rendimientos de degradación. Los reactores combinados se trata de un sistema de dos fases, en la primera fase, se utiliza un tanque donde se lleva a cabo la degradación anaerobia propiamente dicha, y en la segunda fase existe otro tanque donde se lleva a cabo el almacenamiento y concentración del lodo digerido y para la formación de una capa de sobrenadante clarificada. En la Figura 2.23 se observan estos tipos de reactores.

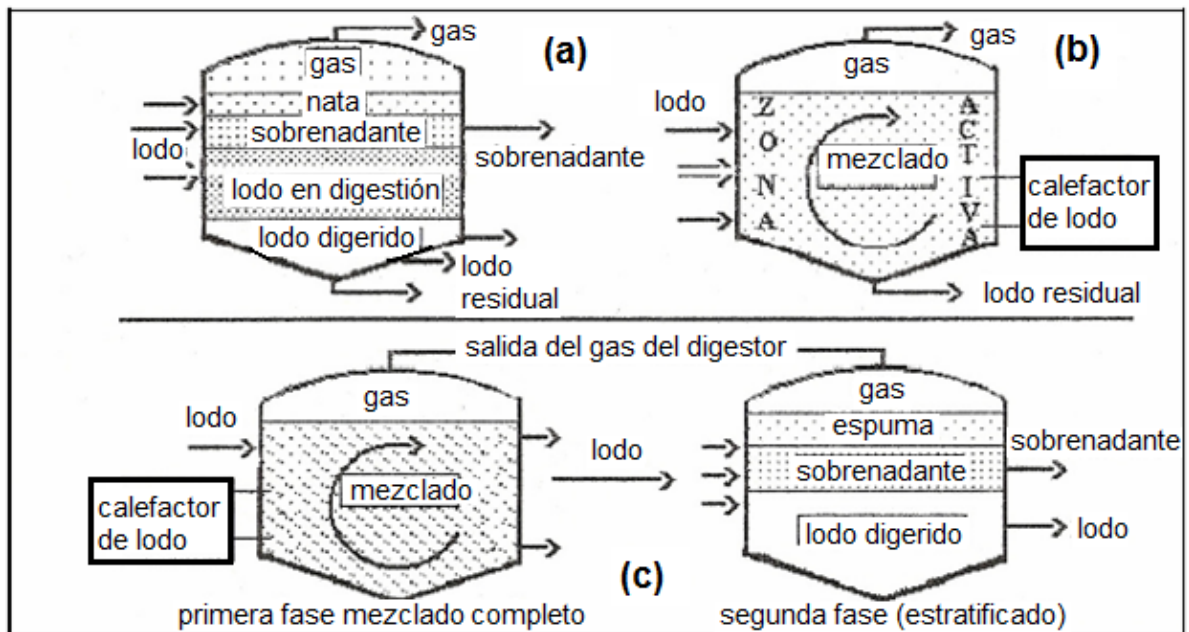


Figura 2.23 a) Reactor de tasa baja, b) reactor de tasa alta, c) combinados (Durán de Bazúa, 1993)

- **Reactor anaerobio hindú y chino:** El reactor anaerobio hindú o de domo flotante consiste en un tanque reactor vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás. De esta forma, se consigue una presión de biogás baja sobre la superficie, además, se logra una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. La campana también

ayuda al rompimiento de la espuma que se forma durante el proceso. En la Figura 2.24, se muestra un esquema del reactor hindú.

El reactor anaerobio chino o de domo fijo, no tiene campana flotante, sino techo fijo para la recolección del biogás. Son tanques redondos y achatados con el techo y el piso en forma de domo. En este caso, a medida que aumenta la producción de gas, aumenta la presión en el domo, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, alcanzando altas presiones de biogás en su interior. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores. En la Figura 2.25, se muestra un esquema de este tipo de reactores.

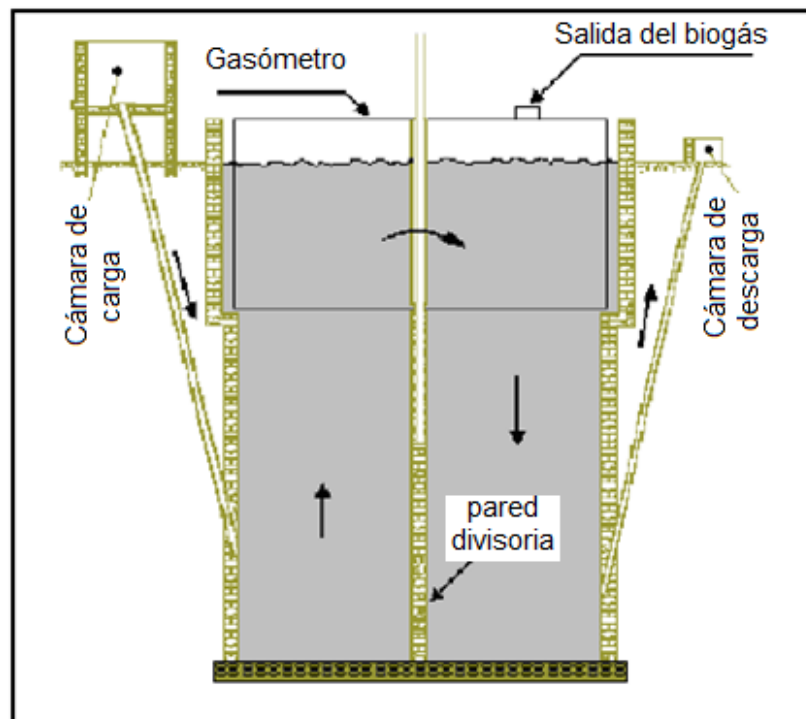


Figura 2.24 Reactor tipo hindú (FAGRO, 2009)

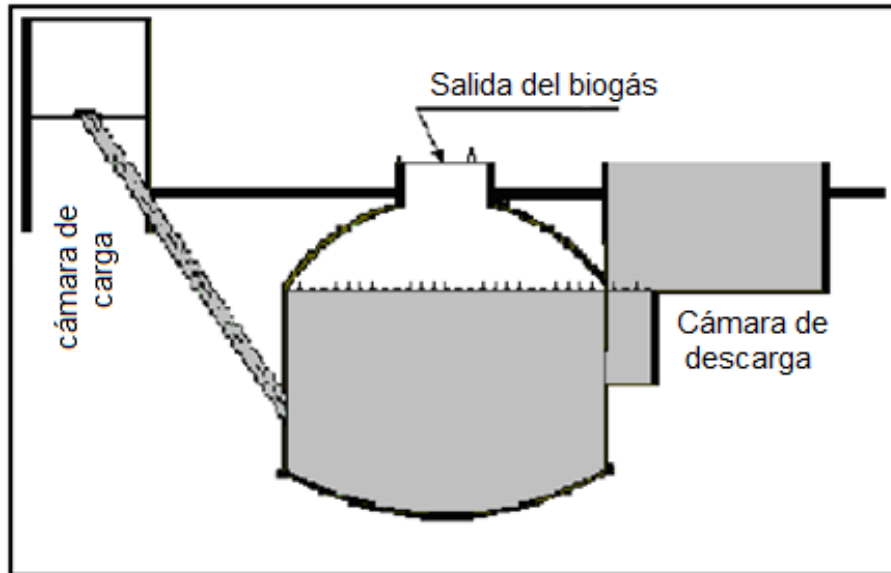


Figura 2.25 Reactor tipo Chino (FAGRO, 2009)

Los reactores anaerobios más usados en los rastos, comprenden los de tipo flujo ascendente, de filtros anaerobios, de domo flotante y de flujo- tapón, aunque dichos reactores se utilizan para el tratamiento de desechos líquidos como sangre y aguas de lavado, siendo el composteo, el único tratamiento utilizado actualmente para los residuos sólidos.

### 2.13 Diseño de reactores anaerobios

El diseño de los reactores anaerobios, debe responder tanto al lugar como al grado de aplicación y la finalidad del mismo. Conociendo la región, localidad y el lugar donde se construirá, y en función de la cantidad de desechos que serán tratados, se selecciona el tipo de reactor anaerobio más adecuado, de acuerdo a una secuencia que permita tener una idea clara del tamaño y forma del reactor que se requiere.

Su diseño abarca una serie de actividades que deben ser consideradas, desde la etapa preliminar, hasta el cálculo del costo de materiales y esquemas. A continuación se enlista una secuencia de las consideraciones pertinentes al momento de diseñar un reactor anaerobio (Guevara, 1996):

1. Recolección de información socio-económica, climatológica, y dimensiones de la zona en que se construirá el reactor.
2. Determinar el objetivo y el régimen de operación (continuo o discontinuo) del reactor, además de seleccionar el tipo de reactor anaerobio más conveniente para la zona en estudio.
3. Construcción para lo cual se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones:
  - Cálculo del volumen de la cámara de fermentación
  - Cantidad, tipo y demanda de la materia prima a utilizar
  - Volumen de carga y descarga
  - Sistemas de medición y certificación del biogás
  - Cálculos de las dimensiones de las instalaciones (espesor de pisos, columnas, altura, diámetro de la cámara de fermentación, etc.)
  - Requerimientos y costos de materiales de construcción
  - Representación gráfica del modelo con base a sus dimensiones

- **Recolección de información**

Esta información es indicativa, ya que depende del objetivo del reactor y de su ubicación, se deben obtener los siguientes datos:

- Ubicación política, características geográficas, condiciones climatológicas y demás que se crean relevantes
- Condiciones y dimensiones del terreno destinado para el reactor
- Condiciones sanitarias, abastecimiento de agua, disposición de residuos, y posibles zonas de carga y descarga
- Niveles de producción animal, agrícola y pecuaria del lugar y sus alrededores

- **Tipo y régimen de operación del reactor**

Se deben analizar los recursos económicos, técnicos y de materiales con los que se cuenta además de determinar el régimen continuo ó discontinuo de acuerdo a los niveles de desechos que se manejarán, o a la cantidad de biogás que se requiere en el lugar.

- **Construcción**

Es importante contar con los recursos económicos y humanos antes de iniciar esta etapa.

- Cálculo del volumen de la cámara de fermentación: Para calcular el volumen de la cámara de fermentación, se aplican las ecuaciones 2.5 y 2.6.:

$$VCF = VCT + (5 - 10) \% VCT \dots\dots\dots (2.5)$$

$$VCT = (TRH) \times (VCD) \dots\dots\dots (2.6)$$

Donde:

VCF = Volumen de la cámara de fermentación

VCT = Volumen de la carga total\*

TRH = Tiempo de residencia hidráulico

VCD = Volumen de carga diaria

\*NOTA: El VCT máximo no debe ser mayor al 95% del VCF

El TRH representa el tiempo en que la carga está dentro del reactor. Se sugiere para la degradación anaerobia de desechos con una concentración de sólidos totales mayor al 5% en régimen continuo, un TRH de 10 días (Guevara, 1996).

- **Cantidad, tipo y demanda de la materia prima a utilizar**

El Volumen de Carga Diaria (VCD), se debe calcular tomando en cuenta el volumen de desecho a tratar o el volumen de biogás demandado.

- Para el caso del volumen de desechos provenientes de animales, a tratar, se calcula la cantidad de excremento de cada animal (EA), mostrada en la Tabla 2.19. Así como, la cantidad de residuos de matanza (RM), para cada animal y se multiplica por el número total de animales (TA), además de sumar la cantidad de agua para limpieza durante la matanza (AL) de cada animal. Se considera una dilución en sólidos del 10 a 15%, de lo cual se obtienen los residuos totales, siendo este equivalente al VCD lo cual se ilustra en la ecuación 2.7.:

$$VCD = (EA + RM + AL) \times TA \dots\dots\dots(2.7)$$



**Tabla 2.19 Producción estimada de residuos (Arias, 1986)**

<b>Productor</b>	<b>Peso del animal (kg)</b>	<b>Producción diaria de estiércol (kg)</b>	<b>Producción anual de estiércol (kg)</b>
<b>Cerdo</b>	50	6	2,190
<b>Vaca</b>	500	34	12,410
<b>Caballo</b>	500	10	3,650
<b>Oveja</b>	15	1.5	548
<b>Ave</b>	1.5	0.1	36.5
<b>Humanos</b>	50	0.5	182.5

- Para el caso del volumen de biogás demandado, se debe considerar que en caso de no generar los residuos suficientes para satisfacer la demanda de biogás del lugar, es preciso tener una fuente alternativa de desechos, además de conocer el rendimiento de biogás del desecho (RB), el cual se puede obtener de la Tabla 2.20. Una vez contemplado esto se aplica la ecuación 2.8.:

$$VCD = \frac{DTB}{RB} - DBE * \dots\dots\dots(2.8)$$

Donde:

VCD = Volumen de carga diaria

DTB = Demanda total de biogás

RB = Rendimiento de biogás del desecho

DBE = Demanda de biogás de los equipos

\* NOTA: El DBE Se calcula con base al requerimiento de combustible fósil del equipo, tomando en cuenta los siguientes parámetros simplificados para una mezcla de biogás al 60% de metano:

$$\text{Biogás} = 60\% \text{ metano} + 40\% \text{ CO}_2$$

- Poder calorífico = 5,500 kcal / m<sup>3</sup>
- Eficiencia de combustión = 60%
- Poder calorífico efectivo = 3,300 kcal/m<sup>3</sup>

**Tabla 2.20 Producción de biogás proveniente de diversas fuentes (Morris, 1980)**

Materia prima	Biogás (m <sup>3</sup> biogás / kg SV)	Tiempo de retención Días	Sólidos volátiles %
Estiércol bovino	0.0158	35	4
Estiércol porcino	0.0315	35	6
Estiércol de ave	0.05652	35	9
Estiércol ovino	0.0245	35	5
Estiércol humano	0.02303	35	7
Estiércol equino	0.00852	35	3

- **Volumen de carga y descarga:** Una vez obtenido de carga diaria, es posible obtener el volumen de descarga que corresponde a la cantidad de lodos digeridos, calculando el porcentaje de desechos que se degradan que es cercano al 50-60% de sólidos totales dependiendo de la materia prima empleada. (Carranza, 2008). Lo cual se observa en la ecuación 2.9.:

$$\text{VE (volumen del efluente)} = \text{VCD} - (50-60\% \text{ VCD}) \dots \dots \dots (2.9)$$

El volumen del efluente (VE) o de los lodos digeridos, será menor en esta proporción y se debe tener contemplada una superficie en el terreno para confinar y dar tratamiento adicional a dichos lodos.

- **Sistemas de medición y certificación del biogás**

La certificación del biogás hace referencia a la existencia de metano en este. El cual es el componente principal y de mayor interés en la degradación anaerobia, para lo que se puede tomar una muestra del gas que se produce diariamente en el reactor y someterlo a una flama. Si la flama se intensifica y presenta una coloración azul turquesa, se delata la presencia en el biogás de metano, aunque es posible realizar una cromatografía de gases si se tiene acceso al equipo. Por otra parte, se utiliza un gasómetro conectado a un medidor de flujo (fluxómetro) como sistema de medición del biogás ya que promueve presiones de operación constantes y confiere al sistema cierta autonomía de almacenamiento pues se compone de dos partes. Una parte inferior compuesta de un tanque de agua y otra superior que es una cubierta flotante provista de un sello para evitar el escape del biogás y la admisión de aire para evitar presiones negativas. Pueden estar contruidos de concreto, mampostería, metal, fibra de vidrio o plástico. Se recomienda usar materiales livianos en la construcción de la cubierta flotante. En la Figura 2.26 se muestra un esquema simplificado de un gasómetro.

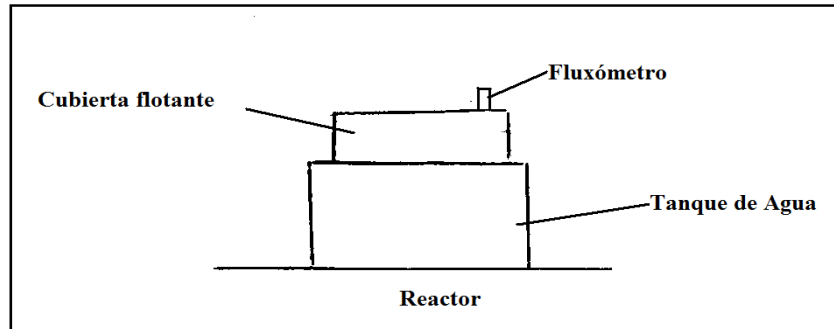


Figura 2.26 Esquema de un gasómetro (Guevara, 1996)

- **Cálculos de las dimensiones de las instalaciones**

Una vez que se ha determinado la superficie destinada para la construcción del reactor anaerobio, es preciso realizar la medición de la misma tomando en consideración el volumen de la cámara de fermentación (VCF). Para determinar la altura y diámetro de la misma, se procede a delimitar el espesor de pisos, cantidad de columnas, tipo y tamaño de paredes, diámetro e instalación de tuberías, para lo cual se debe contemplar el VCD y el VE, así como la delimitación de un área de carga y descarga.

- **Requerimientos y costos de materiales de construcción**

El requerimiento de los materiales a emplear, se determina de acuerdo al tipo de reactor que se desea construir, además de considerar el presupuesto destinado para tal efecto. Con lo que es posible calcular los costos de los materiales dependiendo del tipo de material y la cantidad de este que se empleará en la construcción del reactor.

Se multiplica el costo de cada material por la cantidad del mismo y sumando los costos totales, procurando no tener sobrantes de éste. Los cuales, si bien es

cierto que son inherentes a la compra del material, se pueden aprovechar contemplándolos previamente además de evitarlos teniendo una buena secuencia y planeación de la construcción del reactor para lo cual es necesaria su representación esquemática previa.

- **Representación gráfica del modelo con base a sus dimensiones**

La representación gráfica del reactor es una herramienta que permite afinar los cálculos de sus dimensiones además de que permite tener una visión abstracta del resultado final con lo que se cometerán menos errores en el proceso de construcción, se debe considerar el tipo de reactor a construir con base a los modelos descritos en el punto 2.11.

## **2.14 Tratamiento anaerobio de desechos en rastros**

El tratamiento anaerobio de desechos está orientado a la producción de biogás utilizando desechos ricos en materia orgánica los cuales se someten a un proceso biológico en ausencia de oxígeno con el fin de obtener gas metano el cual es uno de los metabolitos principales de las bacterias metanogénicas.

Éste proceso se lleva a cabo en contenedores cerrados o digestores y puede ser de tres formas diferentes: Sistema no continuo, donde los desechos se cargan en el digestor y permanecen en reacción durante un tiempo determinado (TRH), continuo donde se introducen cargas diarias y se extrae la misma cantidad de entrada con el fin

de mantener el reactor en la máxima producción de metano, y semi-contínuo, donde la materia orgánica permanece en reacción por un TRH determinado y al término de éste, se renueva la carga en su totalidad.

Por otro lado, existen tratamientos previos que permiten aprovechar los desechos por la vía de la degradación anaerobia, los cuales pueden ser mecánicos como la reducción del tamaño de partícula, biológicos como el empleo de enzimas in vivo o in vitro, físico- químicos como los tratamientos térmicos y la solubilización de componentes al variar el pH, o sus combinaciones (Mata- Álvarez y col., 2000). Para el caso del sacrificio de pollos de engorda los desechos representan el 20% del peso vivo del animal conformados por plumas, sangre, vísceras, estiércol, recortes y huesos, los cuales después de recibir un tratamiento previo a la degradación anaerobia, aumentan su rendimiento en la producción de metano manteniéndolo entre 37 a 51% (Salminen y Rintala, 2001a).

Dichos tratamientos pueden ser para el caso de la sangre, vísceras y estiércol, maceración, secado y pulverización con el fin de aumentar la superficie de contacto con las bacterias degradativas y hacer más fácil su manejo al momento de su disposición, además para el caso de los residuos como plumas, recortes y huesos, se pueden utilizar tratamientos térmicos a 120°C durante 5 minutos combinados con tratamientos enzimáticos utilizando de 2 a 10 g/L de endopeptidasa alcalina comercial, esto con el propósito de inducir la hidrólisis de las proteínas como la queratina presente en las plumas y colágeno presente en los huesos a fin de reducir el tamaño de la cadena

peptídica y hacerla más asimilable para las bacterias anaerobias. Se pueden utilizar además de las peptidasas, lipasas e hidrolasas con el propósito de reducir de tamaño las cadenas de ácidos grasos, carbohidratos y demás componentes presentes en los desechos. En la Tabla 2.21 se muestran los distintos tratamientos previos a un tratamiento anaerobio y los desechos a los que se aplica.

**Tabla 2.21 Tipos de tratamientos previos al tratamiento anaerobio de desechos en rastros (Mata- Álvarez y col., 2000)**

<b>Tratamiento</b>	<b>Sangre</b>	<b>Vísceras y estiércol</b>	<b>Plumas, huesos, cerdas, cuernos y pesuñas</b>
<b>Mecánico</b>	Maceración	Reducción de tamaño	Maceración y Pulverización
<b>Biológico</b>	Esterilización, Proteasas	Lipasas, hidrolasas y proteasas	Peptidasas
<b>Físico-químico</b>	Secado, solubilización	Hidrólisis ácida/básica	120°C/5min. Acidificación o alcalinización

Finalmente es importante mencionar que existen variables que afectan la producción de biogás o gas metano durante su degradación anaerobia independientemente de los tratamientos previos a los que se someta la materia prima. Una de ellas la relación entre el flujo de entrada y el tiempo de retención hidráulico (TRH) ya que al introducir cargas pequeñas y utilizar TRH mayores se obtiene una mejor producción de biogás, caso contrario el hecho de utilizar cargas masivas y TRH menores, esto debido a que existe una sobrecarga en el sistema (Salminen y Rintala, 2001b )

## 2.15 Normatividad

En los rastros TIF y municipales, existen ciertos requisitos que se deben cubrir para tener un óptimo, humanitario e higiénico aprovechamiento de los recursos animales que allí se manejan, además de considerar el apropiado manejo de los residuos que se generan diariamente, por lo que existen ciertas normas oficiales mexicanas (NOM) aplicables a rastros y mataderos que son de carácter obligatorio para este tipo de establecimientos, expedidas por distintas dependencias gubernamentales mencionadas a continuación:

- **Secretaría de Salud (SSA):**
  - **NOM-1994-SSA-2004-** Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. especificaciones sanitarias de productos.
  - **NOM- 120-SSA1-1994-** Bienes y servicios. prácticas de higiene y sanidad para el proceso de alimentos, bebidas no alcohólicas y alcohólicas.



- **NOM- 145- SSA1- 1995-** Productos cárnicos troceados y curados. productos cárnicos curados y madurados. disposiciones y especificaciones sanitarias.
- **NOM – 201- SSA1- 2002-** Productos y servicios. agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel, especificaciones sanitarias.
- **NOM- 092- SSA1- 1994-** Bienes y servicios. método para la cuenta de bacterias aerobias en placa.
- **NOM- 111- SSA- 1994-** Bienes y servicios. método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos.
- **NOM – 112- SSA- 1994 -** Bienes y servicios. determinación de bacterias coliformes. técnica del número más probable.
- **NOM- 114- SSA1- 1994-** Bienes y servicios. método para la determinación de salmonella en alimentos.
- **NOM- 115- SSA1- 1994-** Bienes y servicios. método para la determinación de *staphylococcus aureus* en alimentos.

- **NOM- 127- SSA1- 1994-** Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
  
- **Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA):**
  - **NOM- 004- ZOO- 1994-** Control de residuos tóxicos en carne, grasa, hígado y riñón de bovinos, equinos, porcinos y ovinos.
  - **NOM- 008- ZOO- 1994-** Especificaciones zoosanitarias para la construcción y equipamiento de establecimientos para el sacrificio de animales y los dedicados a la industrialización de productos cárnicos.
  - **NOM- 009- ZOO- 1994-** Proceso sanitario de la carne.
  - **NOM- 023- ZOO- 1995-** Identificación de especie animal en músculo de bovinos, ovinos, equinos, porcinos y aves, por la prueba de inmunodifusión en gel.
  - **NOM- 024- ZOO- 1995-** Especificaciones y características zoosanitarias para el transporte de animales, sus productos, subproductos, productos químicos, farmacéuticos, biológicos y alimenticios para su uso en animales o consumo por estos.
  - **NOM- 033-ZOO-1995-** Sacrificio humanitario de los animales domésticos y silvestres.

- **Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS):**
  - **NOM- 001- STPS- 1993-** Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo. condiciones de seguridad e higiene.
  - **NOM- 006- STPS- 1993-** Manejo y almacenamiento de materiales- condiciones y procedimientos de seguridad.
  - **NOM- 011- STPS- 1993-** Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido.
  - **NOM- 016- STPS- 1993-** Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo referente a ventilación.
  - **NOM- 025- STPS- 1993-** Relativa a los niveles y condiciones de iluminación que deben tener los centros de trabajo.
  - **NOM- 028- STPS- 1993-** Relativa a la seguridad de colores para la identificación de fluidos conducidos en tuberías.
  
- **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT):**
  - **NOM- 001- ECOL- 1996-** Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua en aguas y bienes nacionales.

- **NOM- 002- ECOL- 1996-** Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal.
  
- **NOM- 004 – SEMARNAT- 2003-** Protección ambiental, lodos y biosólidos, límites máximos permisibles.
  
- **NOM- 098- SEMARNAT- 2002-** Protección ambiental, incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

## Capítulo 3 Metodología

### 3.1 Estudio de caso

Para implementar el proyecto en los rastros, se deben considerar ciertos factores. El estudio de caso se realizó en el Rastro Municipal de Jilotepec, Estado de México, el cual se muestra en la Figura 3.1, de donde vienen los desechos analizados en este trabajo, uno de dichos factores es la conversión del rastro municipal en un rastro TIF, es por ello que en el establecimiento entre otras cosas se debe acoplar un sistema de tratamiento de desechos; de ahí la necesidad de construir un reactor anaerobio en dicho rastro.



Figura 3.1 Rastro municipal de Jilotepec, Estado de México

Por otra parte, se sabe que debido a la falta de personal y cuidado en la operación de equipos complicados, se debe considerar un reactor de bajo costo y poco

mantenimiento que sea capaz de tratar los volúmenes diarios de desechos que ahí se generan durante la matanza diaria. Se observó durante la visita al rastro, que existe una zona donde podría construirse dicho sistema de tratamiento la cual se muestra en la Figura 3.2. Puesto que se recomienda construir el reactor anaerobio cerca de los corrales donde se tienen a los animales que se manejan, tales como vacas y cerdos. El plano del rastro se observa en la Figura 3.3



Figura 3.2 Zona de instalación para el reactor anaerobio en el rastro

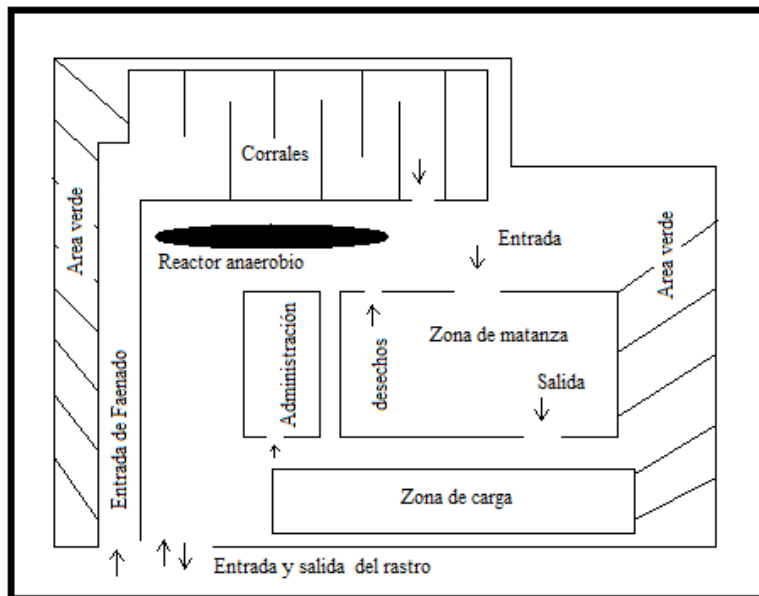


Figura 3.3 Plano del rastro y posible zona de construcción del reactor para el tratamiento de los desechos

### 3.2 Caracterización de desechos sólidos y líquidos del rastro

Los desechos sólidos con los que se trabajó durante la investigación están constituidos de estiércol, grasa y pedacería. Además de que se obtuvieron muestras de sangre de desecho, la cual es una mezcla de sangre con agua, es decir, sangre diluida aproximadamente 1 en 10. Los desechos fueron transportados en contenedores cerrados y a su llegada al laboratorio se homogenizaron y se redujeron a un tamaño aproximado de cuatro por cuatro centímetros con el fin de facilitar su manejo experimental.

Para su caracterización se determinaron sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF), sólidos volátiles (SV), y en el caso de la sangre además de los anteriores, sólidos totales suspendidos (SST) mediante los métodos normalizados descritos en el manual APHA (1992). Los resultados iniciales de dichas determinaciones se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Resultados de la caracterización inicial de los desechos**

Muestra	ST mg/l	SF mg/l	SV mg/l	SST mg/l
<b>Desechos sólidos</b>	210,590	31,919	178,671	N/A
<b>Desechos líquidos (sangre)</b>	7,588	2,451	5,137	912

En la Figura 3.4 se observa parte del procedimiento utilizado además se determinó la densidad de los desechos mediante el principio de Arquímedes.



Figura 3.4 Determinación de sólidos totales, fijos y volátiles

### 3.3 Pruebas anaerobias

En esta etapa se realizaron ensayos con el objetivo de determinar el tiempo en que los desechos en estudio generan biogás por sí mismos, llevando a cabo su degradación en reactores anaerobios de polietileno de 3.3L de volumen a régimen discontinuo mostrados en la Figura 3.5.

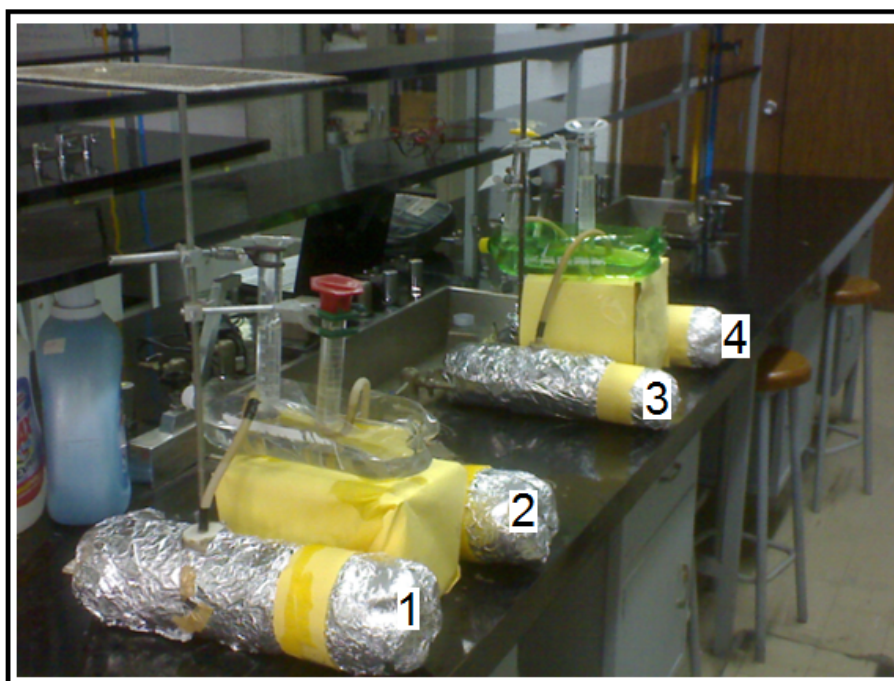
Además se realizaron diversos arreglos experimentales con el fin de determinar las condiciones de mayor producción de biogás variando la dilución de los desechos como se muestra en la Tabla 3.2.

También se realizó una corrida comparativa utilizando las mismas condiciones utilizando un 30% de excremento de cerdo como inóculo.



**Tabla 3.2 Condiciones experimentales en los reactores durante las pruebas anaerobias**

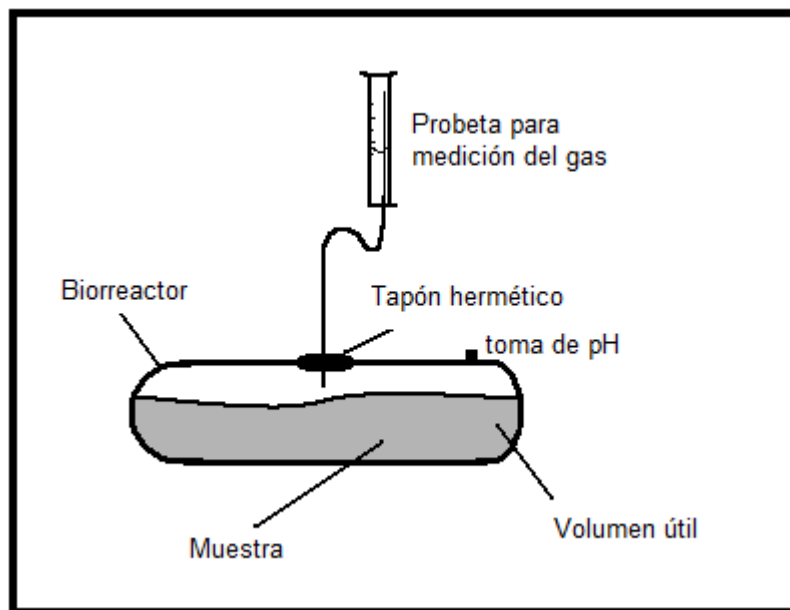
Reactor	Mezcla de desechos	Relación de la mezcla	Densidad	Cantidad
1	Desechos sólidos con agua	1:1V/V	sólidos 0.38g/mL	570g
			agua 1g/mL	1.5L
2	Desechos sólidos con sangre	1:1 V/V	sólidos 0.38g/mL	570g
			sangre 0.5g/mL	1.5L
3	Sangre	N/A	0.5g/mL	3L
4	Desechos sólidos	N/A	0.38g/mL	1140g



**Figura 3.5 Reactores empleados durante las pruebas anaerobias a régimen discontinuo**

Los reactores se protegieron del crecimiento de hongos impidiendo la entrada de luz, utilizando papel aluminio.

Se utilizó un sistema simplificado como se muestra en la Figura 3.6 para realizar las pruebas en los reactores, ya que uno de los objetivos fue desarrollar un diseño que requiriera de bajo mantenimiento.



**Figura 3.6 Esquema simplificado de los reactores experimentales en régimen discontinuo**

Durante las pruebas anaerobias realizadas a los cuatro reactores de cada corrida, se monitorearon los parámetros empleando los equipos mostrados en la Tabla 3.3, con lo que se determinaron las condiciones óptimas para la obtención de biogás.

Por otra parte, se recopilaron muestras de biogás las cuales fueron almacenadas en tubos de ensaye con tapón de hule y sello hidráulico, para el cual se utilizó una disolución saturada de cloruro de sodio con HCl al 50% y rojo de metilo.

**Tabla 3.3 Parámetros monitoreados y equipo empleado durante las pruebas anaerobias**

<b>Parámetro</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Duración</b>	<b>Equipo</b>
<b>pH</b>	5 veces por semana	18 días	pH metro digital
<b>Cantidad de biogás desprendida (mL)</b>	5 veces por semana	18 días	Probetas graduadas de 500mL por desplazamiento de agua
<b>Agitación manual</b>	5 veces por semana	18 días	Manual
<b>Sólidos totales</b>	1 a 2 veces por semana	18 días	Estufa a 105°C por 1h
<b>Sólidos fijos</b>	1 a 2 veces por semana	18 días	Mufla a 550°C por 1h
<b>Sólidos volátiles</b>	1 a 2 veces por semana	18 días	Mufla a 550°C por 1h
<b>Cuantificación de CH<sub>4</sub> en biogás</b>	Días 41, 45 y 52 del experimento	11 días	Prueba de flama

Además de lo anterior, se realizó una neutralización de pH para los reactores con el propósito de mantenerlos dentro del intervalo óptimo, para lo cual fue necesario adicionar bicarbonato de sodio en las proporciones descritas en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Proporciones de NaHCO<sub>3</sub> empleadas en la experimentación**

<b>Reactor</b>	<b>mL de sol. Al 10%</b>	<b>Volumen de NaHCO<sub>3</sub> por kg de mezcla de desecho mL / kg</b>	<b>gNaHCO<sub>3</sub>/kg de desecho</b>	<b>Día</b>
<b>1</b>	100	48.3	4.83	5
<b>2</b>	100	75.7	7.57	5
<b>3</b>	50	33.3	3.33	5
<b>4</b>	No necesario	N/A	N/A	N/A

N/A: No aplica

### 3.4 Diseño del reactor

Una vez que se determinaron las condiciones óptimas para generar biogás a partir de los desechos del rastro municipal, se realizó un diseño a escala laboratorio del reactor continuo el cual se muestra en la Figura 3.7.

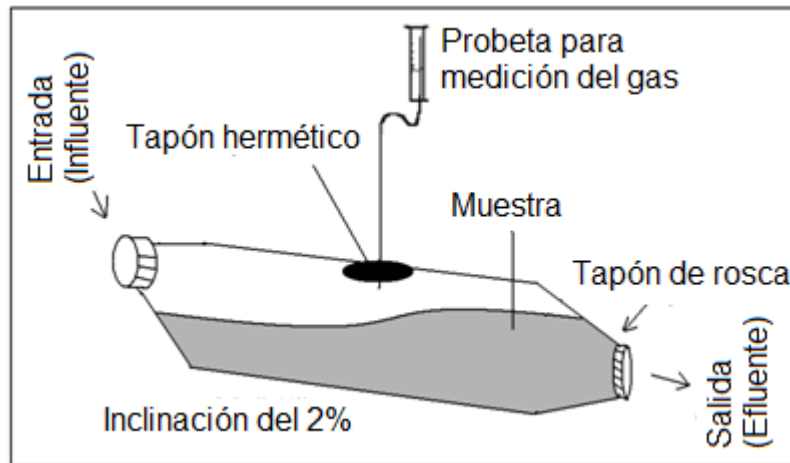


Figura 3.7 Diseño del reactor empleado en régimen continuo

El diseño se realizó con base a un reactor de tipo flujo-tapón, utilizando polietileno en su construcción, con agitación manual diaria, con un sistema de medición de biogás y con un volumen de cámara de fermentación de 3.5L. El reactor empleado se observa en la Figura 3.8.

El objetivo de realizar un diseño sencillo del reactor fue el de simular un reactor de muy poco mantenimiento y control de la operación. La adición de mezcladores y controladores de temperatura no simulan la operación real que se puede ejercer en el rastro. Es por ello, que se buscó mucha simplificación en el diseño.



**Figura 3.8 Reactor anaerobio experimental a régimen continuo**

En este caso, no fue necesario determinar los SF y SV, debido a que se observó que los ST son muy similares a los SV, además de ser representativos y útiles para los efectos del proyecto. Tampoco se realizaron determinaciones de pH en esta etapa puesto que al observar el comportamiento de este parámetro durante las pruebas anaerobias, se observó que una vez controlado, este no se modifica.

En esta etapa, se trabajó con diferentes tiempos de residencia hidráulicos (TRH), obtenidos partiendo del TRH experimental de las pruebas anaerobias, con el objeto de observar el comportamiento en la cantidad de biogás generado. Por lo que al final de cada TRH, se introdujo una carga de influente del 30% con respecto al volumen de carga total (VCT) el cual es de 3000mL.

El 30% del VCT corresponde a 900mL (621g) de mezcla de desechos con agua en relación 1:1 V/V. Se extrajo un efluente del mismo volumen para el caso de TRH de 10,

11 y 12 días, dividiendo esta cantidad entre doce, puesto que fue el TRH en que se obtuvo más biogás, para el caso de TRH de 1 y 2. Durante esta etapa, se utilizaron los equipos y se determinaron los parámetros mostrados en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Mediciones experimentales realizadas en la etapa continua**

<b>Parámetro</b>	<b>Frecuencia para TRH de 10, 11 y 12 días</b>	<b>Frecuencia para TRH de 1 y 2 días</b>	<b>Duración para TRH de 10, 11 y 12 días</b>	<b>Duración para TRH de 1 y 2 días</b>	<b>Equipo</b>
<b>Cantidad de biogás desprendida (mL)</b>	Diario	Diario	41 días	14 días	Probeta graduada 500mL
<b>Agitación manual</b>	Diario	Diario	41 días	14 días	Manual
<b>Sólidos totales</b>	Cada 3 días	Diario	41 días	14 días	Estufa a 105°C por 1h
<b>Cuantificación de CH<sub>4</sub> en biogás</b>	Días 61 y 78 del experimento	Días 97 y 105 del experimento	41 días	14 días	Prueba de flama

## Capítulo 4 Resultados y discusión

### 4.1 Desechos del rastro

Los desechos sólidos del rastro, se caracterizaron inicialmente determinando los parámetros que se muestran en la Tabla 4.1. Además, se determinó la densidad de los mismos encontrando que 24 gramos de desechos desplazaron 62mL de agua. Por lo que la densidad encontrada fue de 24g/ 62mL, es decir 0.38g/mL, con lo que fue posible calcular los litros de muestra empleados.

Tabla 4.1 Resultados de la caracterización inicial de los desechos sólidos

Muestra	ST mg/L	%ST	SV mg/L	%SV	SF mg/L	%SF	pH
1	174,860	46.01	142,134	37.39	32,726	8.61	6.8
2	219,575	57.77	187,362	49.29	32,213	8.47	6.5
3	237,335	62.44	206,517	54.33	30,818	8.10	6.7
<b>Prom. sólidos</b>	210,590	55.40	178,671	47	31,919	8.39	6.66

Asimismo, se realizó la caracterización de la sangre obtenida en el rastro, la cual está rebajada con agua debido a que se trata de la sangre recopilada después de realizar la limpieza de los animales. Se obtuvo una densidad de 0.5g/mL ya que 30.5g de sangre desplazaron 60mL. La medición inicial de ST, SV y SF de la sangre, se muestra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2 Caracterización inicial de sólidos en los desechos líquidos (sangre) del rastro**

<b>Muestra</b>	<b>ST mg/L</b>	<b>%ST</b>	<b>SV mg/L (%)</b>	<b>%SV</b>	<b>SF mg/L (%)</b>	<b>%SF</b>	<b>pH</b>
<b>1</b>	6,922	1.38	4,295	0.85	2,627	0.52	6.3
<b>2</b>	8,255	1.65	5,980	1.19	2,275	0.45	6.2
<b>Prom. Sólidos</b>	7,588	1.51	5,137	1.02	2,451	0.48	6.25

Por otra parte, se realizó la determinación de los sólidos totales suspendidos (SST) en sangre, los cuales son un indicativo de la cantidad de materia orgánica presente en una muestra.

Los SST para los desechos sanguíneos se muestran en la Tabla 4.3. Se observa un valor obtenido de 912mg/L para la sangre analizada, lo que indica la presencia de cierta cantidad de materia orgánica que para efectos de la obtención de biogás por la



vía de la degradación anaerobia es asimilable y la mejor alternativa para evitar lanzar dichos residuos al drenaje.

El valor obtenido es mayor a la cantidad de 200mg/L de materia orgánica que puede estar en un cuerpo de agua para que este pueda utilizarse en actividades urbanas según la NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996). Por lo que ya que el desecho analizado de la sangre corresponde al efluente del rastro, éste representa un riesgo de contaminación.

**Tabla 4.3 Resultados de los sólidos totales suspendidos para los desechos líquidos del rastro (sangre)**

<b>Muestra</b>	<b>Litros de muestra</b>	<b>Gramos de muestra</b>	<b>SST mg/L</b>	<b>SST Promedio</b>
<b>1</b>	0.002	1	800	<b>912mg/L</b>
<b>2</b>	0.004	2	1025	

Para fines comparativos, se calcularon los porcentajes de ST, SV y SF obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.4.

Se observa una diferencia del doble entre el porcentaje de los desechos sólidos obtenido comparado con la mezcla de subproductos descrita por Hejnfelt y Angelidaky (2009).

Debido a que los desechos sólidos además de contener grasa, pedacería, cerdas, vísceras no comestibles, etc., contienen cerca del 40% de estiércol, a diferencia de la mezcla de subproductos que no lo contiene. Por lo que en este último caso, el porcentaje de sólidos es menor.

Asimismo, se observa que el porcentaje de sólidos encontrado en la sangre es mucho menor al compararlo con los resultados obtenidos por Hejnfelt y Angelidaky (2009), ya que la sangre utilizada para realizar dichas mediciones tiene una dilución aproximada de 1:10, puesto que se trata de la sangre de los animales mezclada con el agua de limpieza, a diferencia de la sangre utilizada por Hejnfelt y Angelidaky (2009), la cual no está diluida.

**Tabla 4.4 Concentración de ST, SV y SF en diferentes desechos**

	<b>Desechos sólidos %</b>	<b>Sangre %</b>	<b>Mezcla de subproductos % (Hejnfelt y Angelidaky, 2009)</b>	<b>Sangre % (Hejnfelt y Angelidaky, 2009)</b>
<b>Sólidos totales ST</b>	55.40	1.51	26.9	17.9
<b>Sólidos volátiles SV</b>	47	1.02	23.2	16.8
<b>Sólidos totales fijos SF</b>	8.39	0.48	3.7	1.1

## 4.2 Arranque y operación del reactor anaerobio

Antes de iniciar el arranque del reactor se realizaron pruebas anaerobias, dichas pruebas iniciaron desde el momento en que se produjo biogás, el cual se sometió a una prueba de flama para detectar la presencia de gas metano, obteniendo una flama azul característica de una mezcla al 60% de metano, pues si éste porcentaje fuera menor no se obtendría flama. Para la obtención de biogás pasó un tiempo de 35 días en el caso de la corrida inicial sin inóculo.

Para la corrida con inóculo, no se realizaron dichas pruebas ya que no se logró generar biogás debido al alto contenido de sólidos utilizando como inóculo excremento de cerdo en 30% con respecto al volumen útil de los reactores. La temperatura en los reactores fue la temperatura ambiente promedio de 20°C, puesto que no se utilizó ningún tipo de aislante térmico. Se realizó la medición de la cantidad de biogás para los cuatro reactores.

Asimismo, se determinó el pH durante el tiempo en que se realizaron estas pruebas. Los resultados de pH obtenidos se muestran en la Figura 4.1, donde se observa una acidificación en los días 35 a 41, a partir de los cuales el pH alcanza valores cercanos a 7 debido a la neutralización realizada con  $\text{NaHCO}_3$ .

Se observa también que en los días subsecuentes no hay variaciones significativas manteniéndose el pH dentro de los reactores entre valores cercanos a la neutralidad.

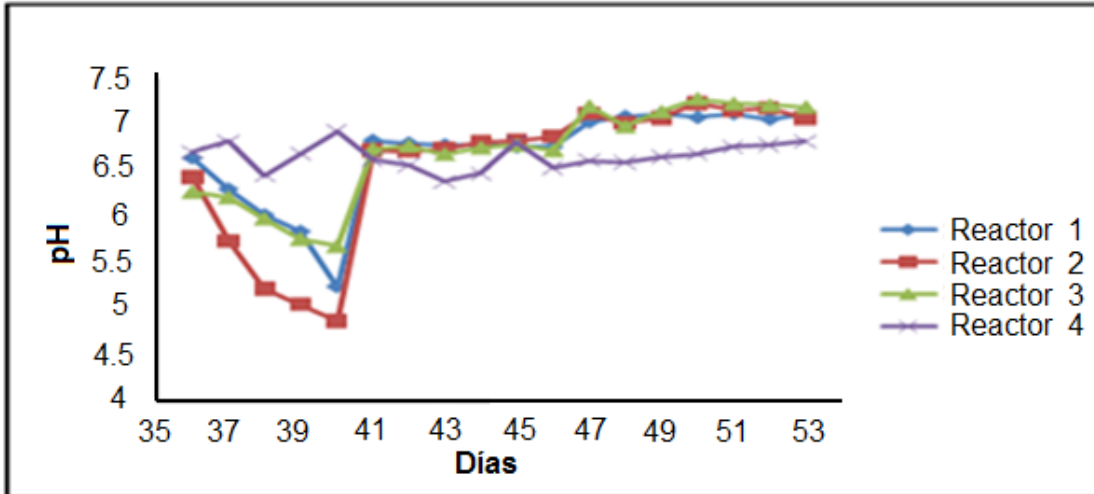


Figura 4.1 Comportamiento del pH a lo largo de la experimentación con el reactor anaerobio

Por otra parte, en la Figura 4.2, se observa el comportamiento entre la cantidad de biogás desprendida y el pH para los diferentes reactores. Se observa que hay una mayor producción de biogás a valores de pH de entre 6.7 y 7.3. Éste comportamiento se debe a que las bacterias metanogénicas proliferan en un intervalo de pH óptimo de 6.7 a 7.8 (Castro- González, 2004).

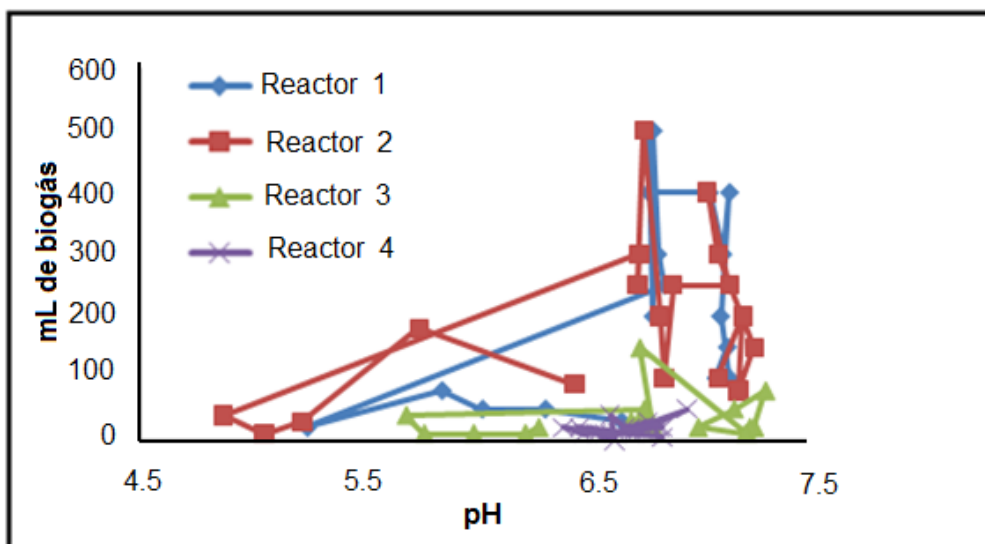
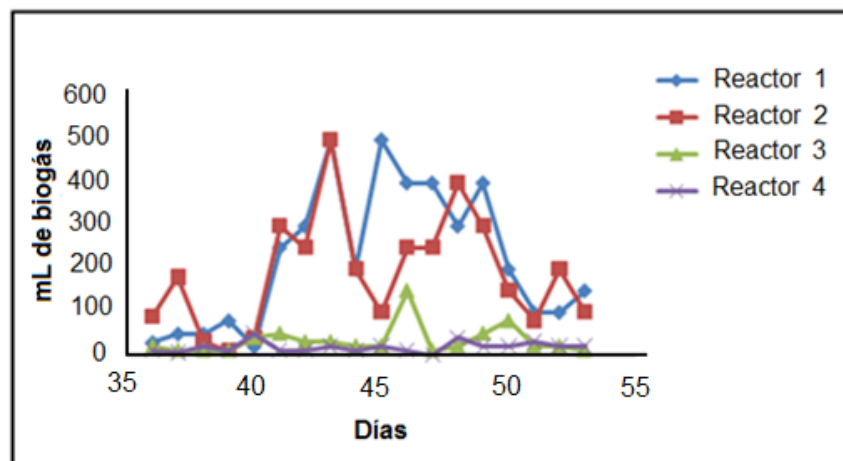


Figura 4.2 Relación de la producción de biogás con respecto al pH de operación

De la misma manera, se analizó el comportamiento en la obtención del biogás a través del tiempo para los cuatro reactores. Dicho comportamiento se muestra en la Figura 4.3. Se observa que hay una producción de biogás considerable a partir del día 40, donde se realizó la neutralización.

La producción de biogás continúa hasta el día 50, observando un comportamiento irregular entre esos días, teniendo un comportamiento exponencial positivo los primeros días dado por el crecimiento de las bacterias metanogénicas y una decadencia a partir del día 48 debido a que se trata de un proceso biológico donde la concentración de sustrato se reduce frenando así la producción de biogás.



**Figura 4.3 Producción de biogás en la experimentación**

Para determinar las condiciones óptimas de generación de biogás en los residuos sólidos analizados, se realizaron mediciones de la cantidad de biogás desprendida diariamente en los cuatro reactores. Se obtuvieron promedios semanales, los cuales se observan en la Figura 4.4. Se observa que el reactor 1, produjo mayor cantidad de biogás siendo estas las condiciones óptimas de degradación, bajo las cuales se realizaron los experimentos subsecuentes.

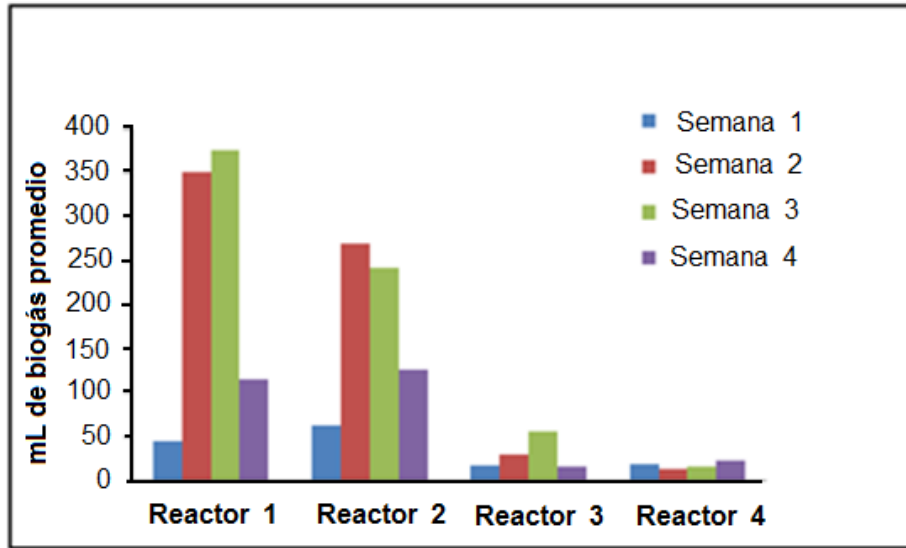


Figura 4.4 Comparación de los 4 reactores experimentales en la producción semanal de biogás

Asimismo se realizó la medición de ST iniciales y finales, se determinó el porcentaje de remoción a régimen no continuo y se determinó la cantidad de biogás desprendido en un TRH de 10 días para los cuatro reactores siendo éste el TRH experimental obtenido en las pruebas anaerobias. Dichos resultados se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados de las pruebas anaerobias para los cuatro reactores

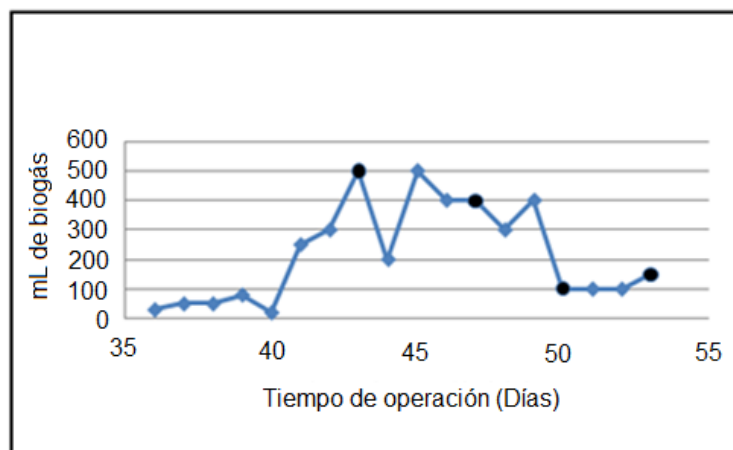
Reactor	Mezcla de desechos	ST(mg/L) Iniciales	ST(mg/L) Finales	% de remoción	mL de biogás acumulados	TRH experimental (días)
1	570g de desechos sólidos con 1.5L de agua	198,475	27,569	86.1	3370	10
2	570g de desechos sólidos con 1.5L de sangre	116,278	31,861	72.5	2700	10
3	3L de sangre	7,588	5,433	28.4	500	10
4	1140g de desechos sólidos	280,741	241,998	13,8	200	10

Una vez que se obtuvo biogás en los reactores, se realizaron determinaciones de ST, SV y SF aunque como el reactor 1 fue el que más biogás produjo, se muestran únicamente los resultados para este. En la Tabla 4.6, se muestran los valores obtenidos de los parámetros medidos para el reactor 1.

**Tabla 4.6 Resultados de las determinaciones de ST, SV y SF para el reactor 1**

Días de operación	Muestra	ST mg/L	SV mg/L	SF mg/L
0	0	198,475	185,230	13,245
43	1	96,529.5	85,979.5	10,550
47	2	58,418.4	46,783.9	11,634.5
50	3	39,839.6	37,945.1	1,894.47
53	4	27,569.4	18,226.8	9,342.59

Las determinaciones se realizaron extrayendo muestras del reactor los días 43, 47, 50 y 53 que corresponden a las cuatro determinaciones realizadas como se ilustra en la Figura 4.5, aunque no se muestra la determinación inicial, ya que esta fue realizada con 35 días de anterioridad, puesto que este fue el tiempo que tardó el reactor para producir biogás. Además se observa que la producción de biogás se inició el día 40 y continuó hasta el día 50, siendo el TRH de 10 días.



**Figura 4.5 Muestra el comportamiento del reactor 1 y los días de muestreo**

Tabla 4.7 Porcentajes de remoción y sólidos removidos en la operación del reactor anaerobio

Muestra	Días de operación	pH	ST mg/L	SV mg/L	SF mg/L	%de remoción de ST	%de remoción de STV	%de remoción de STF	mg de ST removido	mg de SV removido	mg de SF removido	mL de biogás acumulado	mLbiogás / mg ST
0	0	6.4	198,475	185,230	13,245.4	---	---	---	---	---	---	0	0
1	43	6.6	96,529.5	85,979.5	10,550	51.36	53.58	20.34	101,946	99,250.5	2,695.4	1,280	0.01
2	47	7.2	58,418.4	46,783.9	11,634.5	70.56	74.74	12.16	140,057	138,446	1,610.9	2,780	0.01
3	50	6.9	39,839.6	37,945.1	1,894.47	79.92	79.51	85.69	158,635	147,285	11,350.9	3,580	0.02
4	53	7.1	27,569.4	18,226.8	9,342.59	86.10	90.15	29.46	170,906	167,003	3,902.81	3,930	0.02

--- No Determinado



Después de determinar los parámetros correspondientes, se realizaron cálculos para obtener los porcentajes de remoción de sólidos, y la cantidad de sólidos removidos, los cuales se muestran en la Tabla 4.7. Ésto tiene la finalidad de observar el comportamiento de los ST, SV y SF frente a la producción de biogás y observar su relación.

El comportamiento de los ST, SV y SF, frente a la producción de biogás se muestra en la Figura 4.6. Se observa una relación inversamente proporcional entre los ST y SV y el biogás generado, esto debido a la acción de las bacterias metanogénicas, las cuales degradan la materia orgánica presente en los desechos para producir biogás.

Asimismo, se observa un comportamiento constante por parte de los SF, ya que éstos representan la parte mineral en los desechos, la cual no es metabolizada o convertida por las bacterias productoras de metano.

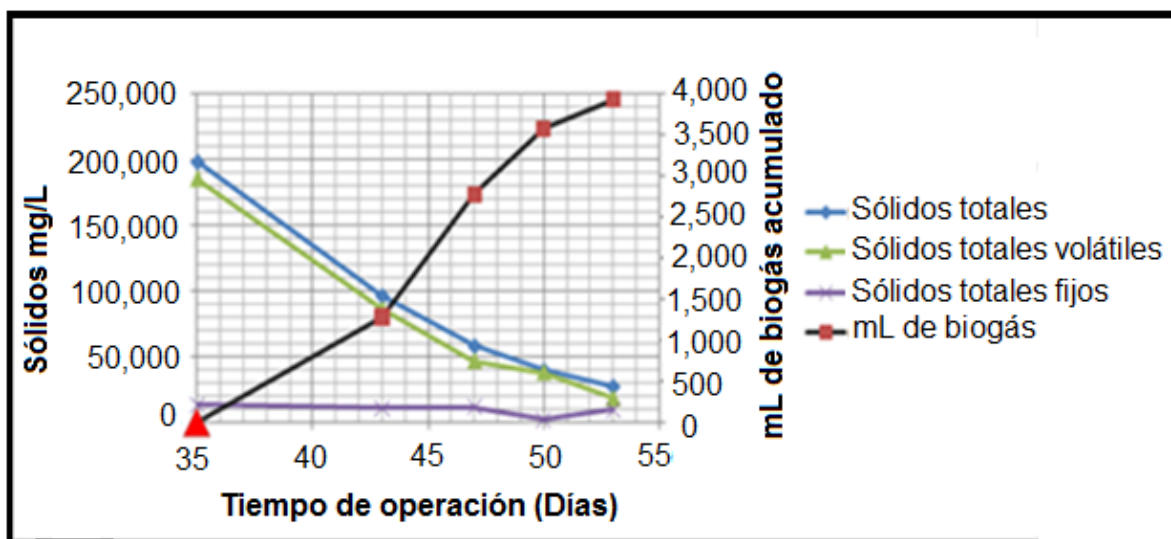


Figura 4.6 Comportamiento de ST, SV y SF durante la experimentación con el reactor anaerobio

Por otro lado, se analizó el comportamiento entre el porcentaje de remoción de sólidos y el tiempo de operación el cual se muestra en la Figura 4.7. Se observa una relación directamente proporcional entre la producción de biogás y el porcentaje de remoción de sólidos. Lo que indica, que mientras más sólidos son removidos existe una mayor producción de biogás, dado que la materia orgánica de los desechos la cual se representa por los ST y SV, sirve de sustrato a las bacterias metanogénicas. Este patrón no aplica para el caso de los SF, donde existe una pequeña remoción de estos, debida a la extracción de las muestras, se observa un pico en el día 50, el cual se atribuye a un error sistemático durante la realización de las pruebas.

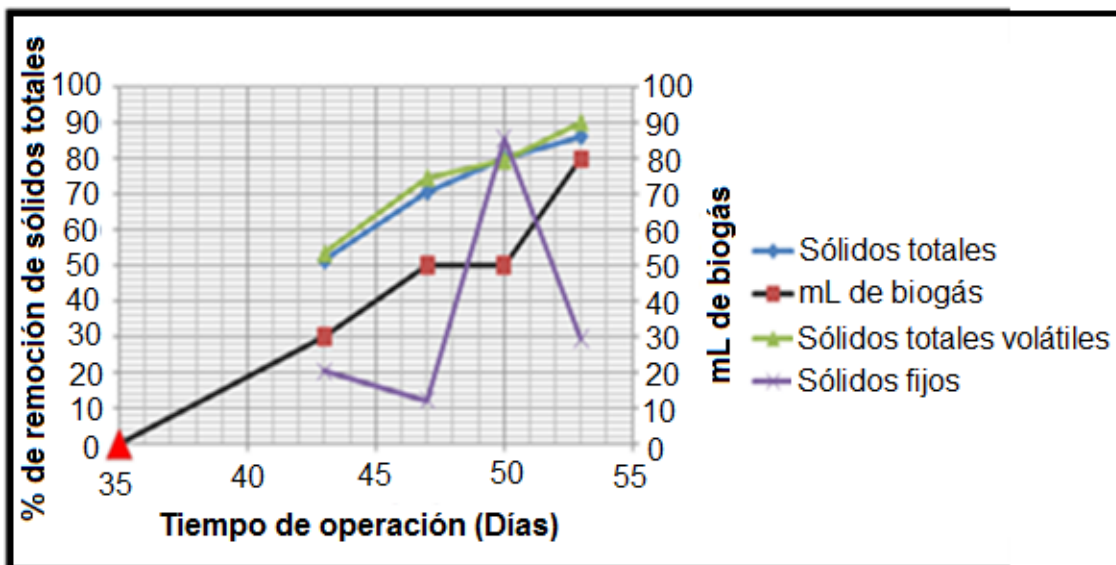


Figura 4.7 Porcentaje de remoción de sólidos durante la experimentación con el reactor anaerobio

Una vez que la producción de biogás llegó a estabilizarse en el reactor 1 se instauró un régimen continuo. Ésto fue con el propósito de continuar la producción de biogás, que se inició el día 53 donde se realizó una determinación inicial de la carga de influente la cual fue del 30% del VCT como se describe en el punto 3.4. Se mantuvo inicialmente

por 10 días debido a que este fue el TRH óptimo obtenido durante las pruebas anaerobias. Se introdujeron 4 cargas al reactor continuo, con diferentes TRH antes de iniciar la carga diaria del reactor.

En la Figura 4.8, se muestra la cantidad de biogás obtenida por día, también se muestra con triángulos los días en que se introdujo el influente y extrajo el efluente y se realizaron determinaciones de sólidos a estos. Se muestran con puntos negros los días en que se realizaron determinaciones de sólidos y en cuadrados los días en que se introdujo el influente y efluente diario, realizando también mediciones de ST diarias. El régimen continuo inicia desde el día 18 en que se introdujo la primera carga a régimen continuo en el reactor.

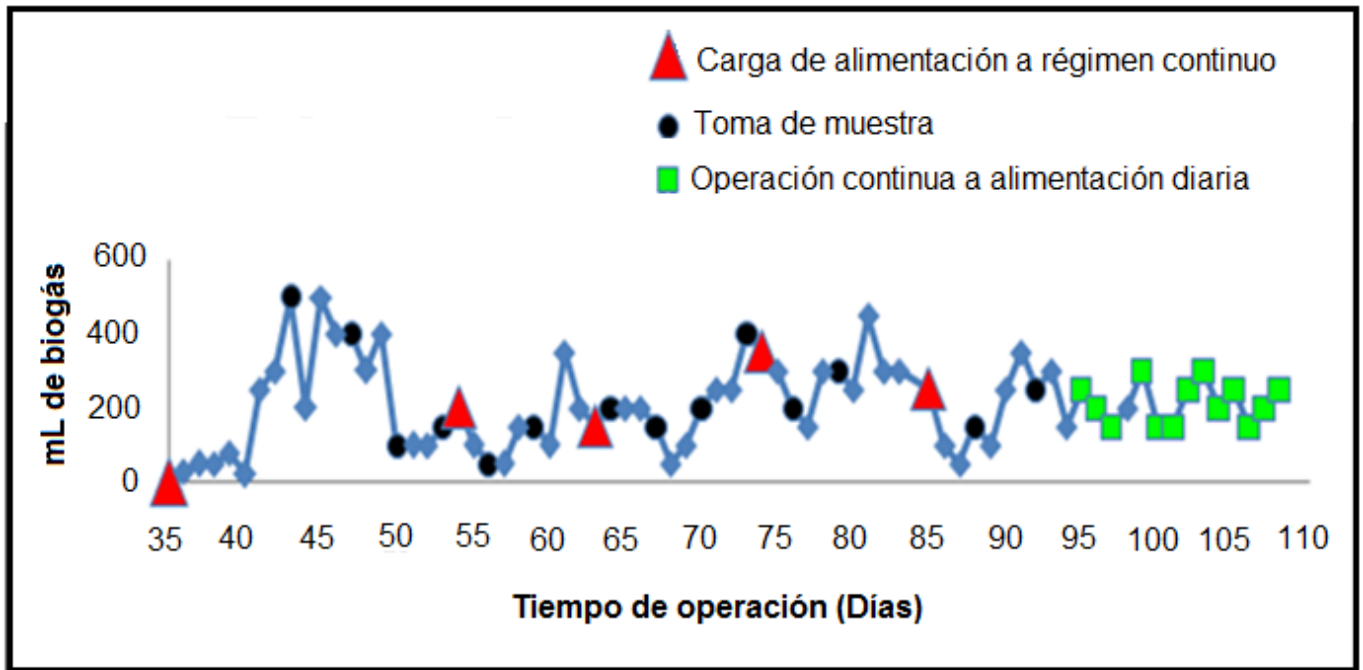


Figura 4.8 Comportamiento en la obtención de biogás del reactor 1 en batch y en forma continua

Los resultados para las mediciones de sólidos durante el flujo continuo se muestran en la Tabla 4.8. La muestra cero, corresponde al análisis de sólidos realizado a la primera

carga del reactor a flujo continuo alimentada el día 53 de operación. Se observa que las determinaciones de SV y SF se realizaron hasta la muestra 8, debido a que se observó que los ST son muy similares a los SV, por lo que a partir de ese momento se trabajó únicamente con los ST.

**Tabla 4.8 Mediciones de sólidos durante el régimen continuo del reactor**

Día de operación	Muestra	ST mg/L	SV mg/L	SF mg/L
53	0	196,426.0	184,573.0	11,852.8
56	1	142,834.1	131,574.0	11,259.8
59	2	88,926.7	82,953.4	5,973.3
64	3	97,297.8	89,070.9	8,227.0
67	4	63,032.4	57,648.5	5,384.0
70	5	49,535.9	45,277.8	4,258.1
73	6	19,928.5	14,733.5	5,195.0
76	7	89,353.4	84,870.8	4,482.6
79	8	56,939.1	52,503.9	4,435.2
87	9	104,031.0	---	---
91	10	71,467.8	---	---
94	11	50,872.5	---	---
95	12	48,921.6	---	---
96	13	43,175.7	---	---
98	14	36,957.8	---	---
99	15	38,597.7	---	---
100	16	41,480.1	---	---
101	17	39,186.5	---	---
102	18	28,476.0	---	---
103	19	42,285.7	---	---
104	20	38,103.3	---	---
105	21	53,967.0	---	---
106	22	41,456.8	---	---
107	23	47,630.5	---	---

--- No determinado

De la misma manera, se realizó la determinación de los porcentajes de remoción de sólidos de las muestras analizadas, las cuales se muestran en la Tabla 4.9. Se muestran los días del experimento en que se realizó el análisis de sólidos.

**Tabla 4.9 Porcentajes de remoción y días de muestreo en régimen continuo**

Muestra	Días de operación	ST mg/L	SV mg/L	SF mg/L	%remoción de ST	%remoción de STV	%remoción de STF	mg de ST removido	mg de STV removido	mg de STF removido	mL de biogás generado acumulado
0	---	196,426	184,573	11,852.8	---	---	---	---	---	---	---
1	56	142,834.1	131,574	11,259.8	27.2	28.7	5	53,591.8	52,999	592.9	50
2	59	88,926.7	82,953.4	5,973.3	54.7	55.0	49.6	107,499	101,620	5,879.4	400
0	64	97,297.8	89,070.9	8,227.0	---	---	---	---	---	---	---
3	67	63,032.4	57,648.5	5,384.0	35.2	35.2	52.8	34,265.3	31,422.4	2,842.9	750
4	70	49,535.9	45,277.8	4,258.1	49.0	49.1	48.2	47,761.8	43,793.1	3,968.8	1,100
5	73	19,928.5	14,733.5	5,195.0	79.5	83.4	36.8	77,369.2	74,337.4	3,031.9	2,000
0	76	89,353.4	84,870.8	4,482.6	---	---	---	---	---	---	---
6	79	56,939.1	52,503.9	4,435.2	36.2	38.1	1.0	32,414.2	32,366.9	47.4	300
0	88	10,4031	---	---	---	---	---	---	---	---	----
7	92	71,467.8	---	---	31.3	---	---	32,563.0	---	---	1,250
8	95	50,872.5	---	---	28.8	---	---	20,594.5	---	---	1,500
9	96	48,921.6	---	---	3.8	---	---	1,950.9	---	---	1,950
10	97	43,175.7	---	---	11.7	---	---	5,745.9	---	---	600
11	99	36,957.8	---	---	14.4	---	---	6,217.9	---	---	1,100
12	100	38,597.7	---	---	10.6	---	---	4,578.0	---	---	1,250
13	101	41,480.1	---	---	3.9	---	---	1,695.6	---	---	1,400
14	102	39,186.5	---	---	5.5	---	---	2,293.6	---	---	1,650
15	103	28,476	---	---	27.3	---	---	10,710.5	---	---	1,950
16	104	42,285.7	---	---	2.0	---	---	890.0	---	---	2,150
17	105	38,103.3	---	---	9.8	---	---	4,182.4	---	---	2,400
18	106	53,967	---	---	24.4	---	---	17,500.8	---	---	2,550
19	107	41,456.8	---	---	23.1	---	---	12,510.2	---	---	2,750
20	108	47,630.5	---	---	11.7	---	---	6,336.5	---	---	3,000

--- No determinado

A modo de complemento, se muestran en la Tabla 4.10 los días de muestreo y los TRH utilizados esos días, además se muestran los mL de biogás / mg ST removido.

**Tabla 4.10 Producción de biogás con respecto a los ST removidos y TRH durante la operación del reactor continuo**

<b>Muestra</b>	<b>Día</b>	<b>mL de biogás</b>	<b>mg de ST removidos</b>	<b>mL de biogás/ mg ST removidos</b>	<b>TRH</b>
<b>1</b>	56	50	53,591.8	0.000932	10
<b>2</b>	59	150	107,499.0	0.001395	10
<b>3</b>	67	200	34,265.3	0.005836	12
<b>4</b>	70	150	47,761.8	0.003140	12
<b>5</b>	73	200	77,369.2	0.002585	12
<b>6</b>	79	300	32,414.2	0.009255	11
<b>7</b>	92	200	32,563.0	0.006141	11
<b>8</b>	95	300	20,594.5	0.014566	11
<b>9</b>	96	150	1,950.9	0.076887	11
<b>10</b>	97	200	5,745.9	0.034807	1
<b>11</b>	99	250	6,217.9	0.040206	1
<b>12</b>	100	200	4,578.0	0.043671	2
<b>13</b>	101	150	1,695.6	0.088464	1
<b>14</b>	102	300	2,293.6	0.130798	1
<b>15</b>	103	150	10,710.5	0.014004	1
<b>16</b>	104	150	890.0	0.168539	1
<b>17</b>	105	250	4,182.4	0.059774	1
<b>18</b>	106	300	17,500.8	0.017142	1
<b>19</b>	107	200	12,510.2	0.015986	1
<b>20</b>	108	250	6,336.5	0.039453	1

Se trabajó con diferentes TRH durante el régimen continuo del reactor, aunque para los TRH de 10, 11 y 12, se utilizó la misma cantidad de influente del 30% del VCT, y para los TRH de 1 y 2, se utilizó esta misma cantidad, pero dividida entre 10, ya que éste fue el TRH encontrado inicialmente.

La Figura 4.9, muestra la cantidad de biogás promedio obtenida para cada TRH, se observa que los valores máximos se obtuvieron a TRH de 12 y 1 respectivamente, obteniendo el valor más bajo en el TRH de 10.

Ésto fue debido a que al introducir la carga de alimentación, los sólidos totales aumentaron repentinamente, por lo que el reactor se desestabilizó y produjo menor cantidad de biogás mientras se acoplaba al régimen continuo, por lo que a TRH mayores hay un mayor tiempo de estabilización.

Para un TRH de 1 y 2, no hubo desestabilización en el reactor, debido a que la carga empleada fue muy pequeña y los ST no aumentaron significativamente.

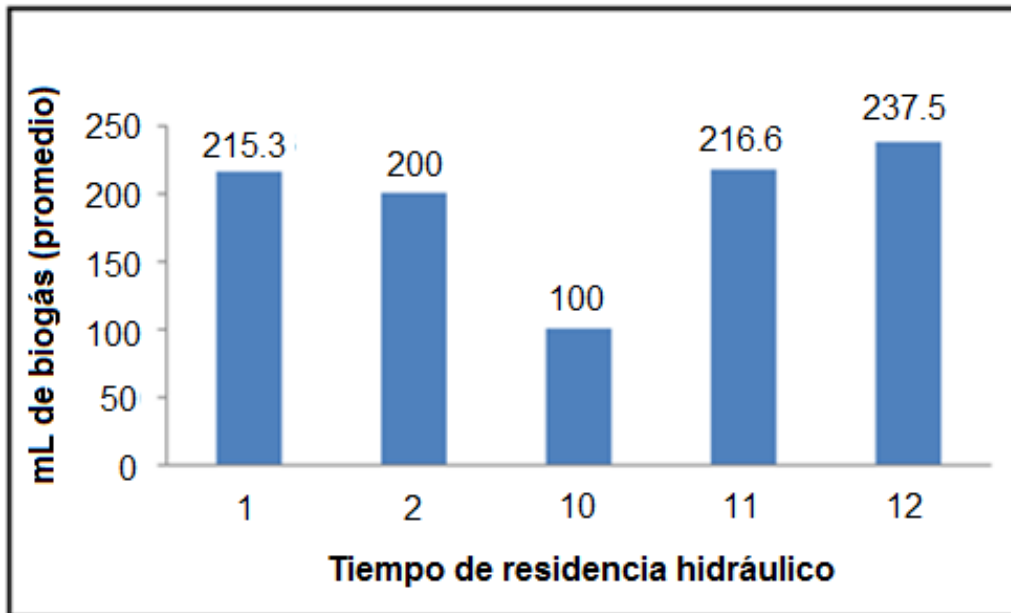


Figura 4.9 Volumen de biogás promedio con respecto al TRH

Partiendo de lo anterior, se compararon mL biogás/mg ST con el fin de determinar el TRH, al cual los desechos sólidos son mas asimilables como sustrato para las

bacterias anaerobias encontrándose este valor mayor en el caso de los TRH de 1, 2 y 11.

En el caso del TRH de 1, esta situación se encontró óptima, debido a que existe una activación por parte de las bacterias que permite asimilar el sustrato y convertirlo en biogás.

Se piensa que de esta manera, las bacterias se conservan en su etapa de crecimiento óptimo. Dicho comportamiento se muestra en la Figura 4.10.

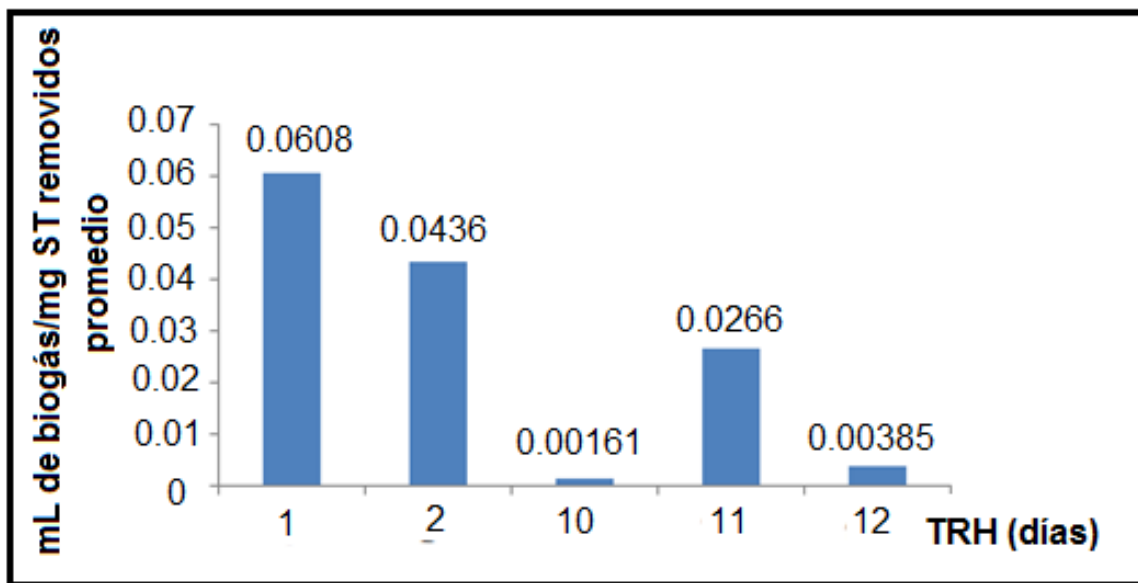


Figura 4.10 Aprovechamiento del sustrato por las bacterias anaerobias a diferentes TRH

Además, se realizó el análisis de los ST removidos el cual, como se muestra en la Figura 4.11. Se observa que para los TRH de 10, 11 y 12, la cantidad de sólidos removidos es mayor, esto debido a que las bacterias tienen más tiempo para degradar la materia orgánica presente.



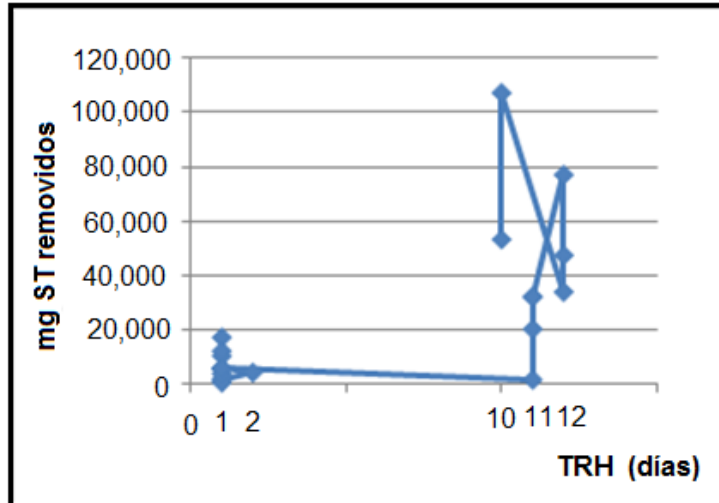


Figura 4.11 Remoción de ST con respecto al TRH en el reactor experimental

Complementando lo anterior, se observa en la Figura 4.12, que para el TRH de 10, 11 y 12 se encontraron los valores mayores del porcentaje de remoción. Debido a que las bacterias gozan de más tiempo para llevar a cabo la degradación. Aunque a TRH de 10, se obtuvo una cantidad de biogás menor como se muestra en la Figura 4.9. Esto es debido a que existió una desestabilización por parte de las bacterias el cual a TRH mayores se alcanza a superar, y a TRH menores puesto que la carga es menor, no existe un cambio drástico de remoción de ST por lo que no se observa tal desequilibrio.

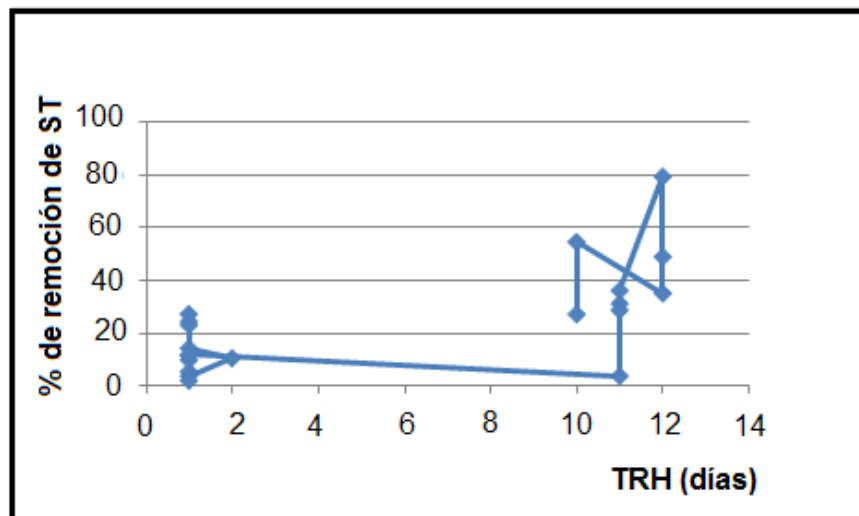


Figura 4.12 Porcentaje de remoción con respecto al TRH

Se determinó la cantidad de biogás acumulado para cada TRH, los resultados se muestran en la Figura 4.13. Se observa el valor máximo para el TRH de 11, aunque éste se complementa con el análisis cromatográfico debido a que puede tratarse de una mayor cantidad de CO<sub>2</sub>. Para el TRH de 1, la cantidad de biogás acumulado no es despreciable, puesto que esta cantidad se obtiene diariamente.

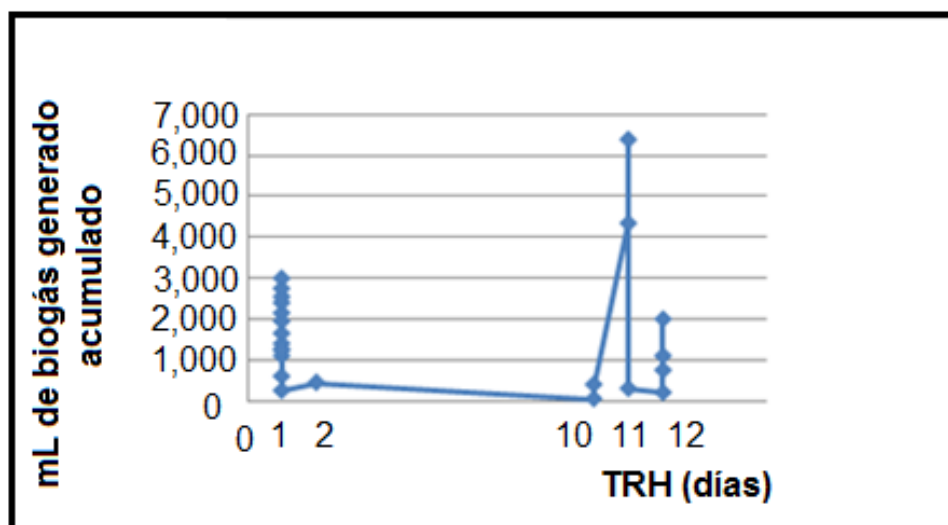


Figura 4.13 Cantidad de biogás acumulado con respecto al TRH

En el caso de la Figura 4.14, se observa la relación entre la cantidad de biogás desprendido por miligramo de ST. Ésto con el propósito de evaluar el rendimiento en la producción de biogás.

En contraste, Hejnfelt y Angelidaky (2009) obtuvieron un valor máximo de 600 L de CH<sub>4</sub>/kg de SV después de 40 días a régimen continuo, mientras que en esta investigación se obtuvo un valor máximo de 168 L de biogás/kg de ST, después de 10 días.

Los ST son muy similares a los resultados de los SV por lo que es posible compararlos entre sí.

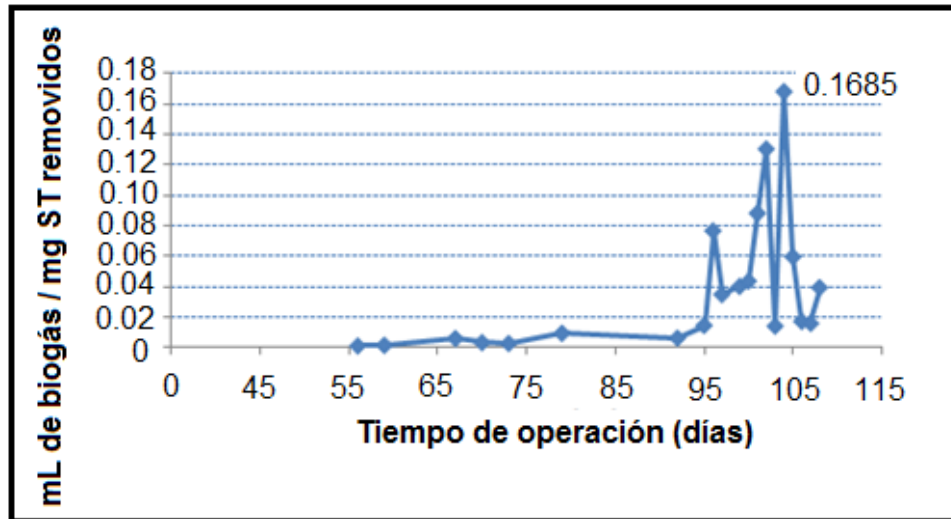


Figura 4.14 Rendimiento de biogás con respecto a los ST

También se muestra en la Figura 4.15, el análisis de la cantidad de sólidos en el influente y efluente del reactor, observando que el influente permanece siempre mayor al efluente incluso durante las cargas diarias como se percibe en la ampliación.

Ésto indica que la carga de entrada es rica en ST mientras que la de salida tiene una menor cantidad de estos. En el interior del reactor se lleva a cabo una degradación de la materia orgánica para la producción de biogás.

Por otra parte, en la Figura 4.16. Se observa la cantidad de biogás generado en función del porcentaje de remoción de ST, obteniendo que a valores mayores de 10, se obtiene una mayor producción de biogás. Por lo que es importante mantener el porcentaje de

remoción mayor a 10 en todo momento, pues de esta manera se garantiza una mayor producción de biogás y por tanto un mayor aprovechamiento de los residuos utilizados como sustrato.

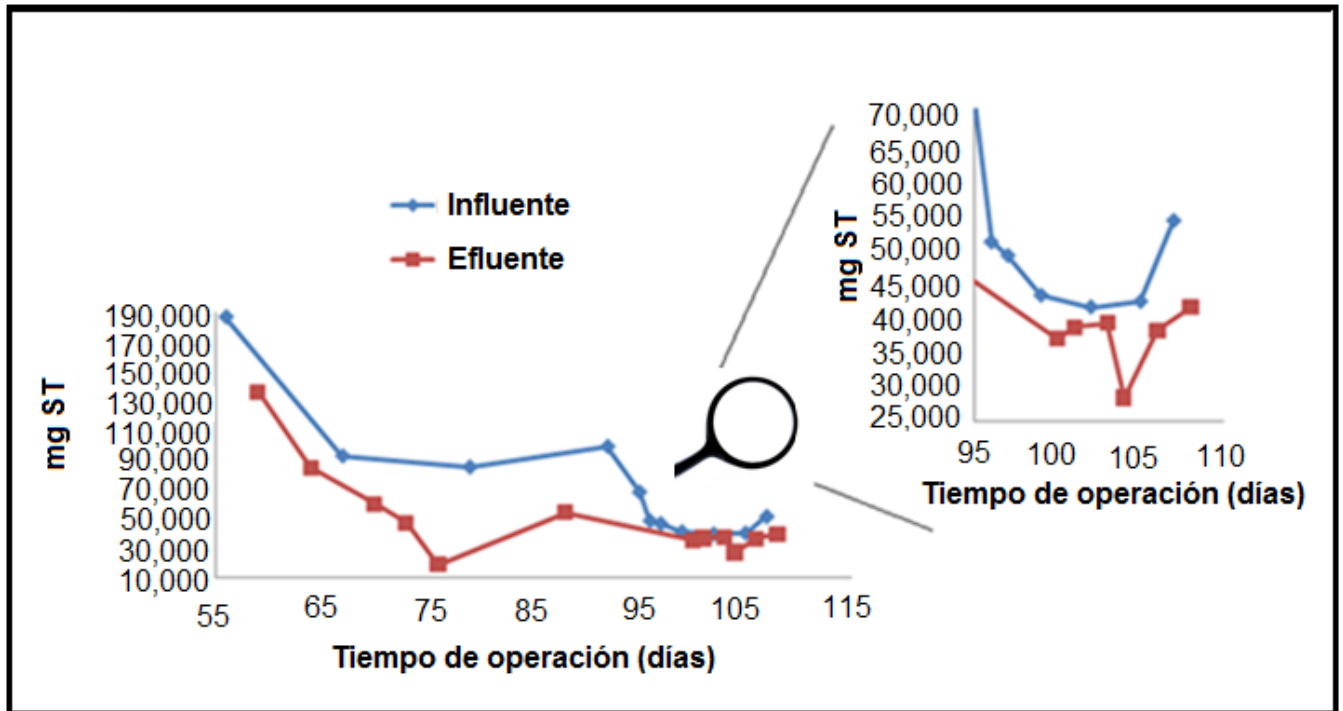


Figura 4.15 Concentración de ST del influente y efluente

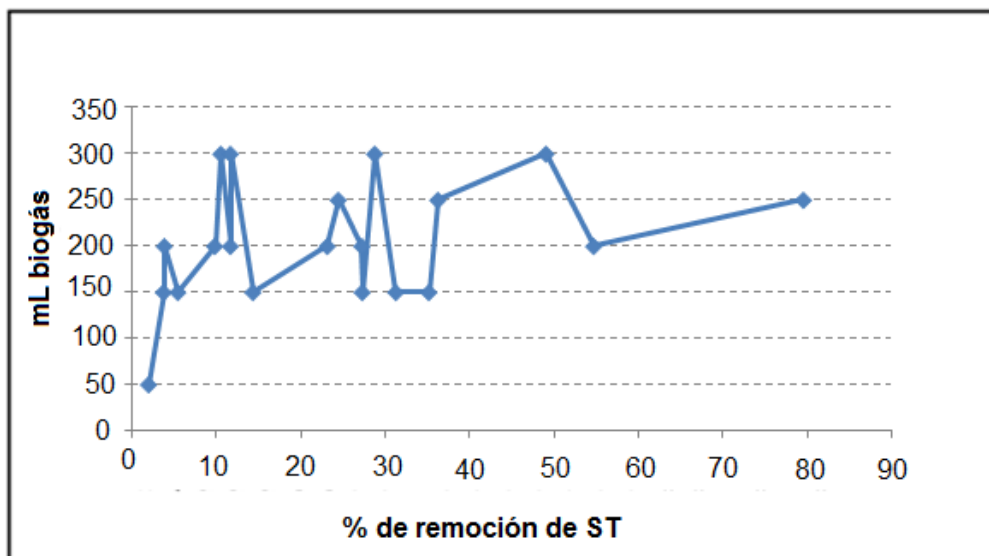


Figura 4.16 Cantidad de biogás con respecto al porcentaje de remoción

En la Figura 4.17, se ilustra el porcentaje de remoción obtenido para cada TRH en función del tiempo de operación, se observa que a TRH de 1 se logró mantener el porcentaje de remoción entre valores mayores a 10, dando así mejores rendimientos en la producción del biogás.

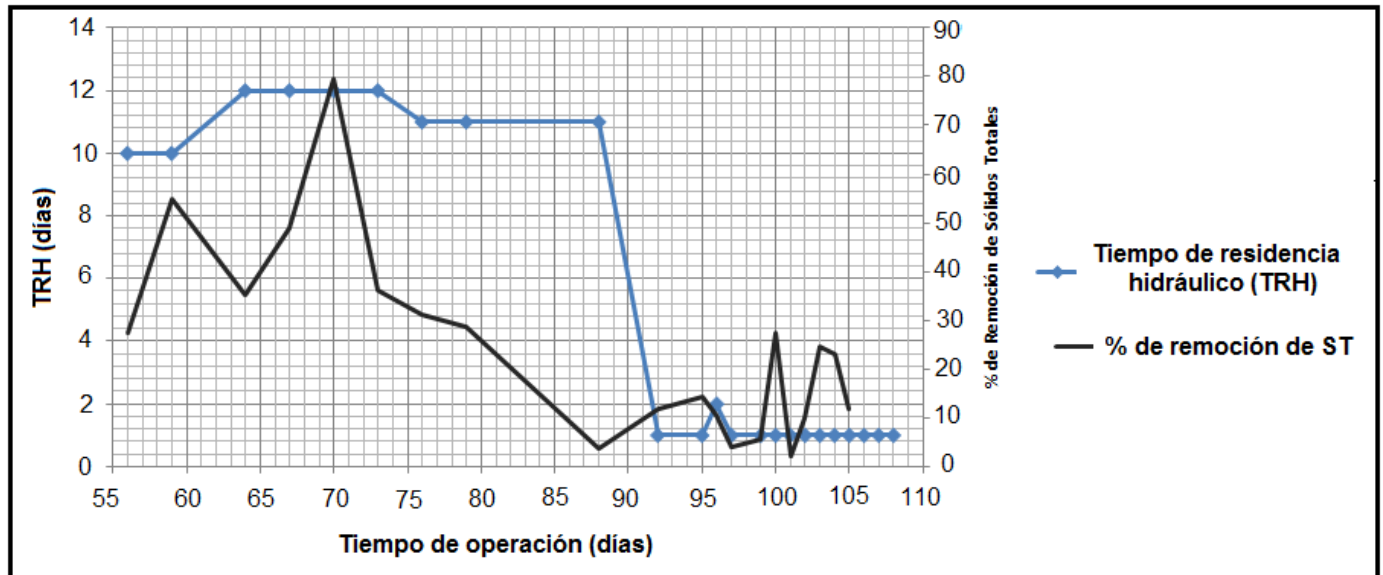


Figura 4.17 Porcentajes de remoción con respecto al TRH

De manera global, se observa en la Figura 4.18, la variación en los sólidos totales para cada carga introducida en el reactor, así como la cantidad de biogás acumulado en cada etapa. Se observa que al inicio de cada carga, la cantidad de ST aumenta y va disminuyendo hasta que se añade la siguiente carga de alimentación.

En el caso de la carga continua, se observa que la cantidad de ST se mantiene relativamente constante entre valores de 50,000 mg/L, es decir a valores de concentración de ST menores.

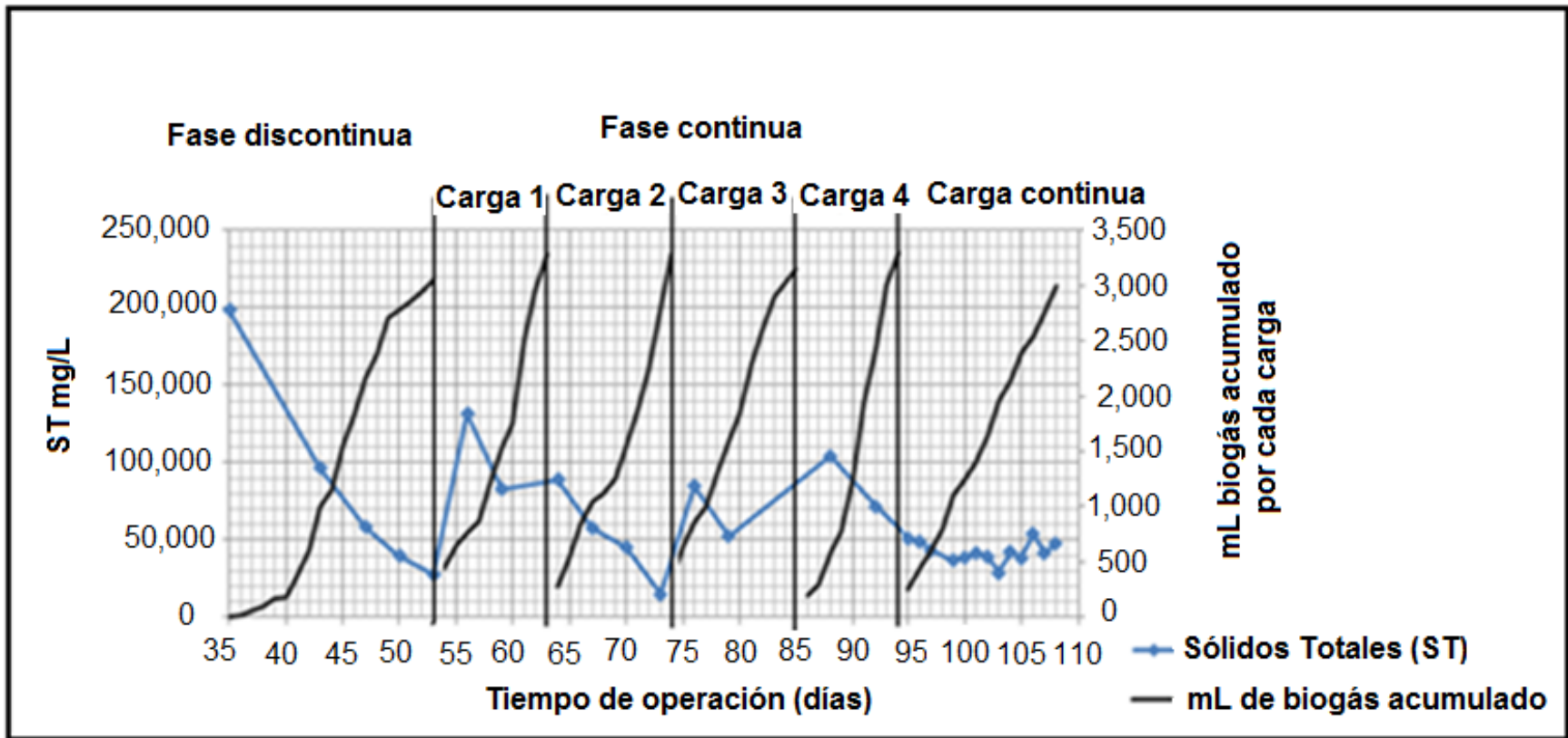


Figura 4.18 Variación de ST y biogás acumulado durante el experimento

### 4.3 Cálculo del reactor anaerobio para ser instalado en el rastro

En el rastro municipal de Jilotepec Estado de México, se trata un volumen de matanza aproximado de 20 reses por día. Lo cual equivale en desechos al 20% del peso total de las reses. Considerando que cada res en promedio pesa 500kg, se deben tratar 2 Ton de desechos sólidos en un TRH de 10 días pues éste tiempo fue encontrado el óptimo experimentalmente en las pruebas anaerobias para llevar a cabo la degradación eficiente de los desechos sólidos como se percibe en la Figura 4.7. Es importante mencionar que los cálculos se realizan considerando una mezcla de desechos sólidos con agua de 1:1 v/v pues éstas fueron las condiciones óptimas de generación de biogás encontradas según la Figura 4.6.

Para el cálculo del tamaño del reactor, se consideran además los 34 kg de estiércol diarios que genera cada uno de estos animales como se indica en la Tabla 2.19. Considerando que por cada animal se gastan 500 litros de agua durante la matanza diaria, aunque para lograr la mezcla en el digestor en relación 1:1 v/v, se considera la misma cantidad en litros de la suma entre EA y RM por animal.

Se sigue la construcción de un reactor anaerobio de tipo flujo- tapón conocido como tipo salchicha, con una relación largo-ancho de 5:1 que puede utilizar un tanque externo de almacenamiento para el biogás, ya que se espera tratar más de 15 m<sup>3</sup> de desechos para lo que se determina el VCF con los siguientes datos (Mandujano, 1981).

Datos:

Desechos diarios aprovechables por res incluyendo el estiércol = 100kg con densidad de 0.38g/mL total = 263.15L.

Volumen de agua por animal en reactor para mezcla 1:1 V/V= 263.15L

Total de animales sacrificados por día = 20

Con lo que se realizan los siguientes cálculos utilizando la ecuación 2.7, descrita en el punto 2.12.:

$$VCD = (EA+RM+AL) \times TA \dots\dots\dots(2.7)$$

$$EA + RM = 263.15L$$

$$AL = 263.15L$$

$$TA = 20$$

$$VCD = (263.15L + 263.15L) 20$$

$$VCD = 10,526.3L \text{ de mezcla de desecho}$$

$$VCT = (TRH) (VCD)$$

$$VCT = (10 \text{ días}) (10,526.3L)$$

$$VCT = 105,263L/\text{día}$$

$$VCF = VCT + (5 - 10) \% VCT; \text{ se sugiere } 10\%$$

$$VCF = 105,263L + 10\% VCT$$

$$VCF = 105,263L + 10,526.3L$$

$$VCF = 115,789.3L \quad (115.78 \text{ m}^3)$$

$$VCF = \pi r^2 h$$



$$VCF = 3.14 \left( \left( \frac{1}{10} \right)^2 h \right) h$$

$$VCF = 3.14 \left( \frac{h^2}{100} \right) h$$

$$h^3 = 100 (VCF) / \pi$$

$$h^3 = 100(115.78) / 3.14$$

$$h^3 = 3,687.55$$

$$h = 15.44\text{m}$$

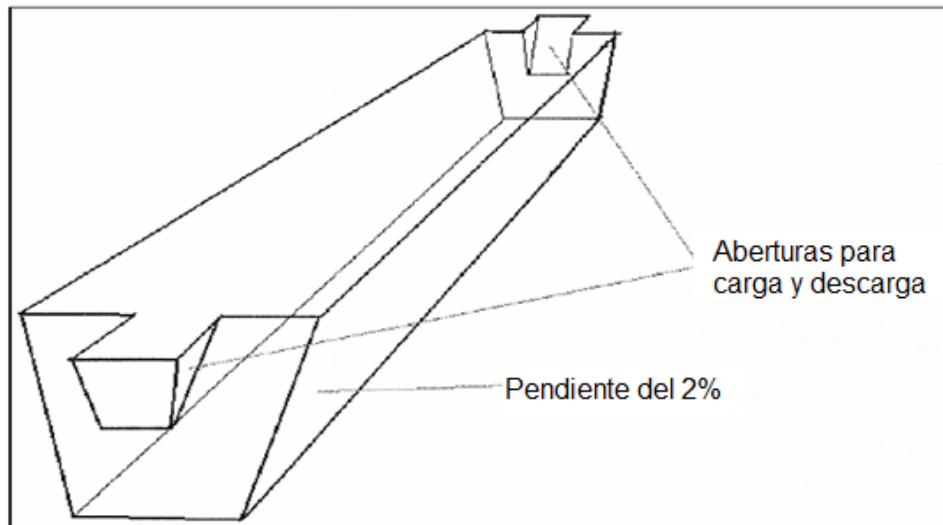
El tamaño del reactor anaerobio sugerido que se obtuvo es de 15.44m de largo aunque para fines de la construcción se consideran 16 metros con una relación largo- ancho de 5:1, es decir 16 x 3.2m, los cálculos fueron realizados considerando que el reactor tiene una forma similar a un cilindro acostado sobre el terreno como se muestra en la Figura 4.19.



**Figura 4.19** Forma teórica de la cámara de fermentación del reactor (Efecte-d, 2010)

Para la construcción de la cámara de fermentación del reactor anaerobio, se sugiere utilizar cemento reforzado, además de utilizar dos tubos de alcantarilla de menor diámetro que esta. Se debe cavar una fosa en el terreno, la cual sirve como aislante térmico y debe tener una relación largo-ancho exterior de 5:1 con la longitud de 16m.

Es decir, debe tener 3.2m de ancho exterior, 2.6m de ancho inferior, 1.6m de profundidad y dieciséis metros de longitud. Las paredes laterales de la fosa deberán tener cierta inclinación para cumplir con las dimensiones descritas, además de paredes lo más lisas posibles y sin riesgo de desbordamiento. En los extremos de la fosa, deben escavarse dos zanjas inclinadas hasta el fondo, y deben tener el mismo diámetro y longitud de los tubos de alcantarilla que se van a utilizar, además la fosa debe tener una inclinación del 2% hacia abajo, desde la zona de influente a la zona de efluente. El esquema de la fosa se muestra en la Figura 4.20.



**Figura 4.20 Esquema de la fosa para la construcción del reactor anaerobio tipo salchicha (Brambila, 2008)**

Como complemento al reactor, se debe colocar una válvula de salida para el biogás, esta se debe colocar en la parte superior de la cámara, a una distancia cercana al tanque de almacenamiento, además de conectar una válvula de seguridad a la válvula de salida, con el objetivo de determinar de una manera rápida si existen fugas de gas. Una vez realizadas estas instalaciones, se conecta un tubo de cobre o acero desde la válvula de salida al tanque de almacenamiento.

#### **4.4 Contribuciones Ambientales**

Actualmente existe un gran impacto de la actividad humana hacia el ambiente, debido en parte a las emisiones de metano que son lanzadas a la atmósfera sin control alguno.

Este proyecto permite captar, controlar y aprovechar la cantidad de metano derivada de la degradación anaerobia de los desechos sólidos de los rastros municipales que actualmente se desechan en terrenos no aptos para su tratamiento mediante la construcción de sistemas de tratamiento como los reactores anaerobios.

De este modo es posible aprovechar la energía potencial del metano y convertirlo en CO<sub>2</sub> mediante su combustión, el cual si bien es cierto que también tiene un impacto atmosférico, es cerca de 23 veces menor que el metano lo cual resulta una alternativa viable y ambientalista para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos.

Por otro lado se sabe que en el caso específico del rastro municipal de Jilotepec, Estado de México, se obtienen cerca de 20 Ton de desechos, los cuales generarían cerca de 120,000 litros de biogás al 60% por día.

Es por ello que la construcción de un reactor anaerobio una alternativa excelente para aprovechar el biogás generado y reducir enormemente las emisiones de metano en esa zona además de los ahorros energéticos que conlleva.

#### **4.5 Contribuciones sociales**

La degradación anaerobia de los desechos sólidos en rastros municipales permite reducir las mermas de producción.

También se reduce la cantidad de desechos, los cuales además de dar un mal aspecto a quienes habitan cerca de alguno de estos establecimientos, representan un grave riesgo de contaminación ya sea por acarreamiento de la lluvia o por emisiones incontroladas lo que repercute en la salud de los habitantes. Por estas razones, es importante la implementación de este tipo de sistemas, puesto que al hacerlo, no solo se reduciría el riesgo de contaminación que conlleva, sino que además se podría abastecer de biogás a determinado número de personas con bajos recursos como una acción altruista por parte de los rastros para mejorar su calidad de vida.

#### **4.6 Contribuciones tecnológicas**

Hoy en día, es cada vez más difícil desarrollar algún tipo de tecnología dado por el costo de los materiales a emplear, o por el tiempo de construcción de las mismas aunado a la dificultad de integrar a la población en su uso. En este caso, se rompe con esos parámetros debido a que los materiales de construcción para los reactores anaerobios pueden ser muy baratos, además de que su tiempo de construcción es muy corto y no se requiere un gran número de personas, por otro lado, no requiere gran

mantenimiento y su modo de operación no tiene mayor dificultad que el desechar los residuos orgánicos al reactor. Además este tipo de tecnología tiene un mayor alcance comparado con otros tipos de tecnologías autosustentables que aunque proveen de ciertas comodidades, son inalcanzables para sectores sociales desfavorecidos.

#### 4.7 Contribuciones económicas

La construcción de reactores anaerobios provee de ciertas ventajas económicas para el establecimiento en el que se encuentra, como es el caso del rastro municipal de Jilotepec en el que la cantidad de gas utilizada por animal en rastro es de 5.5L de gas Licuado de Petróleo (LP) por flameado, además de utilizar entre 156 y 187L para calentar el agua de las pailas a 50 o 60°C, teniendo un gasto de gas LP total para la matanza de 20 animales estimado de 300L, y sabiendo que el costo del gas LP es de 5.12pesos/ Litro (PROFECO, 2008), se podría subsidiar este gasto utilizando el biogás generado de los mismos residuos del rastro como se muestra en la Tabla 4.11.

**Tabla 4.11 Requerimientos y costos gas LP – biogás del rastro municipal de Jilotepec**

<b>Para 20 animales al día</b>	<b>Gas LP</b>	<b>Biogás ( 60% de metano)</b>
<b>Requerimientos en rastro</b>	300L (0.3m <sup>3</sup> )	2,035L (2.035m <sup>3</sup> )
<b>Poder energético</b>	22,390Kcal/m <sup>3</sup>	3,300Kcal/m <sup>3</sup>
<b>Costos por día</b>	1,536 pesos	Excedente de 9,965L (Producción de 12m <sup>3</sup> diarios)
<b>Ahorro mensual (5 días por semana)</b>	30,720 pesos	Sobrante de 199m <sup>3</sup>



## Capítulo 5. Conclusiones

- Se encontró que un kilogramo de desechos genera aprox. 6L de biogás en batch existiendo una alta eficiencia en la producción de biogás por la vía de la degradación anaerobia utilizando desechos sólidos como materia prima confirmando de esta manera la hipótesis planteada inicialmente.
- Se estableció que los parámetros óptimos de arranque fueron la ausencia de inóculo y la menor concentración de ST, utilizando una mezcla de desechos con agua 1:1 V/V. siendo estos los parámetros establecidos en el Reactor 1.
- Se observó que el pH óptimo para llevar a cabo la degradación anaerobia fue de valores entre 6.7 a 7.8.
- Se determinó que la mejor manera de operar el reactor a régimen continuo es introduciendo carga diaria dado por los rendimientos obtenidos mostrados en la Figura 4.16, donde se obtienen los valores mayores, alcanzando un máximo de 168L de biogás/ Kg ST, después de 10 días a régimen continuo.
- Se encontró que la cantidad aproximada de metano en el biogás obtenido fue de 60% lo que conlleva un poder calorífico de 3,300Kcal/m<sup>3</sup>.
- Se obtuvo un ahorro aproximado de 30,720 pesos por mes que puede tener la implementación de un reactor anaerobio como sistema de tratamiento de desechos sólidos

## Referencias

- AEMA, 2010. Environmental terminology and discovery service. Publicación de la Agencia Europea del Medio Ambiente. Copenhague, Dinamarca.
- Aguilar, F. y Botero, R. 2006. Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. *Tierra tropical*. 2(1): 15-2. Revista de la Universidad earth. Sustentabilidad, ambiente y sociedad. ISSN: 1659- 2751.
- AIE, 2004. Biofuels for transport. Publicación de la Agencia Internacional de Energía. Perspective Paris, Francia pp. 82-86.
- AITA, 2009. Obras realizadas. Publicación de la Asociación para la Investigación en Tecnologías Apropriadas S. C. Veracruz, México.
- Alcalde, M., 2009. Estudio técnico y económico en la implementación de biodigestores en zonas rurales del Estado de México a partir de desechos orgánicos. Tesis de licenciatura de Ingeniero Químico. Facultad de Química, UNAM, México D.F., México.
- Alonso, R. 1996. Factibilidad técnico- económica del uso del biogás obtenido de la digestión anaeróbica de estiércol porcino para la generación de electricidad. Tesis de licenciatura Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F., México.
- Ambientum, 2009. Los biocombustibles líquidos. Publicación de la revista Ambientum. La primera revista on-line del medio ambiente. España.
- APHA, 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16a Ed. American Public Health Association. Washington, DC, EEUA.
- Arias, R. 1986. Difusión de programas de biogás en la cuenca del alto Río Cauca. C.V.C. Cali, Colombia. 18p.
- Arimasen, N., 2006. Blue energy cell mechanism. Free software foundation. Estados Unidos.
- *BIODISOL*, 2009. *Que son los biocombustibles. Publicación de IICA, Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture. Estados Unidos.*



- Botero, R. y Preston, T. 1986. Manual de instalación de un biodigestor a bajo costo. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali, Colombia. 35 p.
- Brambila, C. 2008. Factibilidad de la micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás producido de desechos de granjas pisícolas en el Estado de México. Tesis de Licenciatura de la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNAM. 149 p. México D.F., México.
- Carranza, E. 2008. Reutilización de aguas y lodos residuales. Universidad Politécnica de Madrid. Ed. CONCYTEC, 11p. Madrid, España.
- Castellanos, L. 1980. Biodigestores: Una alternativa para solucionar los problemas de energía en las regiones marginadas. Tesis de Licenciatura en Química Industrial, Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán. UNAM. Cuahutitlán, Edo. De México, México.
- Castro-González, A., Pliego-Bravo, y Durán-de-Bazúa, C. 1997. Tratamiento anaerobio de lodos de purga de una planta de lodos activados. Serie: Química Ambiental de agua Volumen 4. Ed. PIQAYQA. Facultad de Química, UNAM. México DF. México.
- Castro-González, A., 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfato- reductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias. Tesis de Doctorado. Facultad de Química, UNAM. p. 199. México DF, México.
- CEFP, 2009. Estadísticas seleccionadas del sector agropecuario, 1980- 2002. Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. Miércoles 30 de septiembre. México D.F., México.
- CIEMAT, 2009. Portal de energías renovables. Publicación del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y tecnológicas. Ministerio de Ciencia e Innovación. España.
- COFEPRIS, 2009. Guía para el manejo de residuos en rastros y mataderos municipales. Publicación de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. Consultado el día jueves 20 de agosto de 2009. México D.F., México.

- CONAE, 2009. Energías renovables. Publicación de la Comisión Nacional de Energía. México D.F., México.
- CONASA, 2009. Planta de rendimiento. Publicación del Consejo Técnico Consultivo Nacional de Sanidad Animal. México D.F. México. Pag. 56
- CONSTRUIBLE, 2008. Todo sobre la construcción sostenible. Noticias. Publicación de Casanovo Soluciones S.L. Valladolid, España
- Crowley, T. y North, G. 1988. Abrupt climate change and extinction events in earth history. **Science**. 240 (4855):996-1002. Revista de American Association for the Advancement of Science.
- Dagnall, S. y Mann, R. 1993. Poultry litter as a fuel for heating broiler houses in the UK. **World's Poultry Science Journal**. 49(1):175-177. Revista de la Universidad de Cambridge, Reino Unido.
- de Betroldi, M., Vallini, G. y Pera, A., 1983. The biology of composting: a review. **Waste Management and Research**. 1(2):157-176.
- DOF, 1996. NOM-001-ECOL-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicación del Diario Oficial de la Federación. México D.F., México.
- Durán-de-Bazúa, C. 1993. Demonstration of cleaner production techniques for the cane sugar agroindustry. Final Projects report. United Nations Industrial Development Organization. México-Viena. 120 páginas. México D.F., México.
- Efecte- d, 2010. Cilindro. Avances en Aerografía. Francia
- ENCARTA, 2009a. Bacteria metanogénica. Enciclopedia Microsoft Encarta Online 1997- 2009. México D.F., México.
- ENCARTA, 2009b. Energía hidráulica. Enciclopedia Microsoft Encarta Online 1997- 2009. Consultado el día lunes 26 de octubre de 2009. México D.F., México.

- ENERGIE- GEOTHERMIQUE, 2009. Geothermie à haute énergie. La géothermie en France. Publicación del Sindicato de Energías Renovables. Francia.
- EPA, 1992. Environmental regulations and technology control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. Publicación de Environmental Protection Agency. EPA/ 625/ R- 92/ 013. USA.
- Estevan, 2008. Biocombustibles: La agricultura al servicio del automóvil. Publicación de la revista El Ecologista. No. 56. ISSN 1575-2712. Ondara, España
- EXPOBIOENERGÍA, 2006. I Congreso internacional de bioenergía. Valladolid, España.
- FAGRO, 2009. Biodegradación de residuos orgánicos sólidos. Publicación de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Uruguay.
- FAO, 2008. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2008: Biocombustibles, perspectivas, riesgos y oportunidades. Publicación de Food an Agriculture Organization. Roma, Italia. ISBN: 978-92-5-306215-7.
- FAO, 2009. La larga sombra del ganado. Publicación de Food an Agriculture Organization. Roma, Italia. ISBN 978-92-5-305571-5
- GREENPEACE, 2009. Energía y cambio climático. Publicación de Greenpeace México. México D.F., México.
- Grobe, H., Graham A. G. 2006. Simplified drawing of the history and future of the carbon dioxide concentration in the atmosphere [en línea]. [ref. de 23 septiembre 2009] University of Tennessee at Chattanooga, United States. Disponible en world wide web: < [http://4.bp.blogspot.com/\\_LgAuUjwmXI0/Rn04UGOw8fl](http://4.bp.blogspot.com/_LgAuUjwmXI0/Rn04UGOw8fl) >.
- Guevara, A. 1996. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Publicación del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Oficina Regional de la OMS. Lima, Perú.
- Hawkes, F., Dinsdale, R., Hawkes, D. y Hussy, I. 2002. Sustainable fermentative hydrogen production: Challenges for process optimization, Publicación de *International Journal of Hydrogen Energy*. 27(1):1339- 13347.

- Hedlund, A. y Xuan, B. 2000. A theoretical integrated nutrient flow on a farm with three sub-systems in An Son village. In Proceedings of the Internet Conference on Material Flow Analysis of Integrated Bio-Systems. Vietnam.
- Hejnfelt, A. y Angelidaki, I. 2009. Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. Waste management. ***Biomass and bioenergy***. 33(1):1046-1054
- INE, 2009. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. Publicación del Instituto Nacional de Ecología. México D.F., México.
- INEGI, 2009. Producto interno bruto en México durante el cuarto trimestre de 2008. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consultado en día martes 15 de septiembre de 2009. México D.F. México.
- INFOAGRO, 2009. ¿Qué es el compostaje? Agricultura en internet. España.
- IPCC, 2001. Climate change 2001: The scientific basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Publicación de Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Jiménez, A. y Martínez, G. 1995. Instalación y arranque de un reactor anaerobio en un tren anaerobio- aerobio de una planta piloto de tratamiento de vinazas. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química C.U., UNAM. México, D.F. México.
- Lawrie, R. 1998. Ciencia de la carne. Profesor de Ciencia de los Alimentos. Publicación de la Universidad de Nottingham, Inglaterra.
- Lemme, J. 1985. Instalaciones aplicadas en los edificios (combustibles, gas, biogás). Primera edición. Editorial Ateneo. Pp. 95. Buenos Aires, Argentina.
- Lenntech, 2009. Water treatments solutions. Países Bajos.
- López, M. 2000. Lodos Residuales: Estudio comparativo de dos métodos para la desinfección de lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de agua residual. Tesis de Licenciatura de la carrera de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. 130p. México DF, México.

- Mandujano, M. 1981. Biogás: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.
- Mata-Alvarez, J., Mace S. y LLabres P, 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research, achievements and perspectives. **Bioresource Technology**. 74(1):3-16.
- Meynell, P. 1982. Methane: Planning a digester. Prism press. Dorchester, Gran Bretaña. 163p.
- Montalvo, S. y Guerrero, L. 2003. Tratamiento anaerobio de residuos: Producción de biogás. Publicación de la Universidad Técnica Federico Santa María Press, Valparaiso, Chile.
- Morris, J. 1980. The digestion of crop residues. An example from the far-east in anaerobic digestion. Publicación de Applied Science Publishers, L.T.D. Londrea, Reino Unido. p. 289- 302.
- Oreskes, N. 2004. Beyond the ivory tower. Publicación de The Scientific Consensus on Climate Change. **Science**. 306 (5702):1686-1689.
- PELAMISWAVE, 2009. Pelamis Wave Energy Converter. Publicación de Pelamis Wave power. Escocia, Reino Unido.
- PORTALENERGIA, 2009. Energía mareomotriz. Publicación de El Portal de las Energías Renovables. España.
- Prats, I. 1996. Manual de gestión de purines y de su selva, reutilización agrícola. Generalitat de Cataluña. P.p. 40-41. Cataluña, España.
- PROCISUR, 2009. Carnes bovinas. Publicación del Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur. Uruguay.
- PROFECO, 2008. Comunicado a medios 027. Procuraduría Federal del Consumidor. Consultado el día lunes 22 de febrero de 2010. México DF, México.

- PyMES, 2009. Proyecto ejecutivo del rastro TIF en Nayarit. Publicación de Pequeñas y Medianas Empresas. Consultado el día martes 10 de noviembre de 2009.
- Reciclable, 2009. Biogás en costa Rica. Digestor [en línea]. [ref. de 14 enero 2009]. [Word Press Themes](#). Designed by [Elegant Themes](#). Disponible en world wide web: < <http://www.reciclable.com.mx/> >.
- SAGARPA, 2009. Estudio de situación actual y perspectiva de la producción de carne de porcino en México. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Consultado el día jueves 03 de septiembre de 2009. México, D.F. México.
- Salminen, E. y Rintala, J. 2001a. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste- a review. ***Bioresource technology***. 83(1):13-26.
- Salminen, E. y Rintala, J. 2001b. Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. ***Water research***. 36 (2002): 3175-3182.
- Sanchez, E., Weiland, P. y Martin, A. 2001. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. ***Process Biochemistry***. 35(5):483-489.
- Sánchez, S., 2003. Energías renovables. Conceptos y Aplicaciones. Publicación de WWF – Fundación Natura. Quito, Ecuador.
- Sasse, L. 1988. Biogas Plants. Design and Details of Simple Biogas Plants. Publicación de Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien Eschborn, DE. 66 p. Alemania
- SEMARNAT, 2009. Cambio climático. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado el día martes 08 de diciembre de 2009. México DF, México.
- Senesi, M., 1989. Composted materials as organic fertilizers. ***The Science of Total Environment***. 81(1):521- 542.

- SOLOCIENCIA, 2009. Las nuevas perspectivas de producción de hidrógeno mediante algas. Publicación de El portal de la ciencia y tecnología en español. México DF, México.
- Troshinaa, O., Serebryakovaa, L., Sheremetievaa, M. y Lindbla db, P., 2002. Production of H<sub>2</sub> by the unicelular cyanobacterium. *International Journal of Hydrogen Energy*. 27(1):1283- 1289.
- UBA, 2009. Biomasa y biocombustibles sólidos. Publicación de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- UNAM, 2009. Planta de composta, Dirección general de obras y conservación. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultado el día miércoles 09 de diciembre de 2009. México D.F. México.
- UPRM, 2009. Universidad de Puerto Rico. Fermentaciones y metanogénesis. p.1-6. Mayagüez, Puerto Rico.
- USDA, 2004. US. Agriculture and forestry greenhouse gas inventory 1990-2001. Publicación de US Department of Agriculture. Global climate change program, technical bulletin no. 1907. Estados Unidos.
- Villanueva, V. 1998. Estado actual de algunas plantas de sacrificio de animales para consumo humano en México. Publicación de la Facultad de medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM. México D.F., México.
- Wagner, C., Torres, S., e Ibañez, B., 2007. Diseño de una planta de tratamiento de agua residual empleando: Tratamiento anaerobio (UASB) y Tratamiento aerobio (Lodos activados). Publicación de Ingeniería Química. El portal de referencia para ingenieros químicos. México D.F., México.
- WWEA, 2009. First world summit for small- scaled wind turbines. Publicación de World Wind Energy Asociation. Bonn, Alemania.