

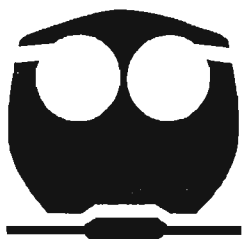


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTABILIZACIÓN DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES POR DIGESTIÓN ANAEROBIA  
MESOFÍLICA Y TERMOFÍLICA

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERA QUÍMICA  
P R E S E N T A  
GABRIELA VARGAS TAH



MÉXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

2005

m. 344033



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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:**

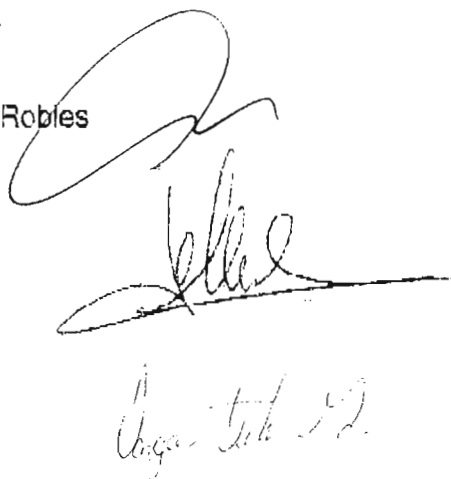
**Presidente** Ana Isabel Carranco Pérez  
**Vocal** Rodolfo Torres Barrera  
**Secretario** Adalberto Noyola Robles  
**1er suplente** Hilda Elizabeth Calderón Villagomez  
**2do suplente** Alfonso Duran Moreno

**Instituto de Ingeniería**

**Dr. Adalberto Noyola Robles**  
**Asesor**

**Dra. Nathalie Cabirol**  
**Supervisor técnico**

**Gabriela Vargas Tah**  
**Sustentante**



## *Agradecimientos*

*A Dios por permitirme vivir tanto tiempo al lado de mis seres queridos y por darme la oportunidad de culminar una parte importante de mi desarrollo como individuo.*

*A mis padres Azarmabet Tah y Chuc y Juan Vargas Balderas por su apoyo, consejos, tolerancia y paciencia para con mi persona.*

*A aquellos que compartieron conmigo todas sus experiencias y conocimientos, ya que sin su ayuda y apoyo no habría sido posible terminar este trabajo.*

*Al Ingeniero Rodolfo Torres Barrera por darme la oportunidad de trabajar a su lado y ayudarme a desarrollarme en el ámbito profesional.*

*Al Instituto de Ingeniería y a todo el personal que labora dentro de él por permitirme realizar mi tesis dentro de sus instalaciones.*

*Con especial agradecimiento al Dr. Adalberto Noyola Robles por permitirme formar parte de su grupo de trabajo y por adentrarme al gran campo de la Ingeniería Ambiental, a la Dra. Natalie Cabirol por brindarme parte de su tiempo en la asesoría de esta tesis y a la DGCOH por el apoyo que brindo a este proyecto.*

*Y a la Universidad Nacional Autónoma de México que ha sido un gran apoyo para el desarrollo de profesionistas y que ha demás es como nuestro hogar.*

## **Dedicatoria**

*Esta tesis quiero dedicarla a mi familia que con grandes esfuerzos me ha apoyado para cumplir esta meta, a aquellos que compartieron conmigo una parte de su vida y a todos aquellos que de una u otra manera siempre confiaron en mí.*

*Con especial cariño a mi madre, quien siempre me brindo un apoyo incondicional y que gracias a su esfuerzo y coraje de salir adelante he podido llegar a esta meta, ya que me enseñó que lo más importante es la familia.*

*A mi padre, por demostrarme lo importante que es tener fuerza de voluntad, por darse una nueva oportunidad de vivir y por enseñarme que es importante no quedarse en la ignorancia.*

*A mis hermanas Alejandra e Isabel, que siempre han estado conmigo en todo momento para darme ánimo y apoyo en los momentos difíciles.*

*A mi abuelita Juanita por brindarme un techo donde cobijarme durante esta etapa de mi vida y por el cariño que siempre ha demostrado hacia mí.*

*A mi padrino Timoteo por consentirme y por compartir conmigo sus grandes experiencias de la vida.*

*A la memoria de mis abuelos Gualberta Chuc, Rafael Tah y Guillermo Vargas.*

*A mis queridos amigos, que siempre me demostraron un gran cariño y un apoyo en todo momento difícil. No quisiera mencionar nombres por miedo a olvidar alguno pero cada uno sabe que siempre lo tendré presente en mi corazón; así que a todos mis compañeros de la Facultad de Química, especialmente a los de primer ingreso que me apoyaron cuando más los necesite, a todos mis compañeros del Instituto de Ingeniería, Noyolitas, Susanitos, Cabiroles, Simonitos, Buitroncitos, Jimenitos e Hidráulicos, además a una gran persona que también fue parte importante de mi desarrollo dentro del Instituto, Arodí.*

*Con todo mi cariño a todas esas personas que siempre estuvieron a mi lado y que tal vez no supe ver.*

---

**CONTENIDO**

<b>LISTA DE TABLAS</b>	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	vi
<b>NOMENCLATURA</b>	viii
<b>RESUMEN</b>	x
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 OBJETIVOS	2
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>2. MANEJO DE LODOS DE DESECHO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</b>	3
2.1 PROBLEMÁTICA DE LOS LODOS RESIDUALES EN EL D.F.	3
2.2 NORMATIVIDAD EN MÉXICO	4
<b>CAPITULO 3</b>	
<b>3. TRATAMIENTO DE LODOS DE DESECHO</b>	10
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS LODOS RESIDUALES	10
3.2 TRATAMIENTO DE LODOS	13
<b>CAPITULO 4</b>	
<b>4. DIGESTIÓN ANAEROBIA</b>	20
4.1 GENERALIDADES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	20
4.2 ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	22
4.3 ASPECTOS FISICOQUÍMICOS	24

---

4.4 DIGESTORES ANAEROBIOS DE LODOS	27
4.5 GEOMETRÍAS DE DIGESTORES ANAEROBIOS	28
4.6 DISEÑO	31
<b>CAPITULO 5</b>	
<b>5. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>34</b>
5.1 DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	34
5.2 CRITERIOS DE OPERACIÓN	36
5.3 ANÁLISIS DE LOS DIGESTORES	38
5.4 PREPARACIÓN DE LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN	39
<b>CAPITULO 6</b>	
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>40</b>
6.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN	40
6.1.1 LODO BIOLÓGICO	40
6.1.2 LODO DE TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO	41
6.2 PARÁMETROS DE CONTROL DE LOS DIGESTORES MESOFILICOS	42
6.2.1 DIGESTOR M1	42
6.2.2 DIGESTOR M2	44
6.3 PARÁMETROS DE CONTROL DE LOS DIGESTORES TERMOFILICOS	46
6.3.1 DIGESTOR T1	46
6.3.2 DIGESTOR T2	48
6.4 PARÁMETROS DE RESPUESTA DE LOS DIGESTORES MESOFILICOS	50
6.4.1 DIGESTOR M1	50
6.4.2 DIGESTOR M2	52
6.5 PARÁMETROS DE RESPUESTA DE LOS DIGESTORES TERMOFILICOS	55
6.5.1 DIGESTOR T1	55
6.5.2 DIGESTOR T2	58
6.6 RESULTADOS DE OPERACIÓN REPRESENTATIVOS	62

---

6.7 BIODIGESTORES MESOFÍLICOS Y TERMOFÍLICOS	63
<b>CAPITULO 7</b>	
7. CONCLUSIONES	67
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	69



## LISTA DE TABLAS

No. Tabla	Descripción	Página
2.1	Límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en biosólidos.	5
2.2	Limites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.	6
2.3	Límites máximos permisibles para lodos en función de su contenido de metales y tasas acumuladas máximas permitidas.	8
2.4	Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.	8
3.1	Composición química de los lodos crudos y digeridos (López, 2000)	11
4.1	Ventajas y desventajas del proceso de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales y lodos de desecho (Lettinga et. Al., 1980; II reporte anual, 1999)	21
4.2	Rangos típicos de temperatura para diversos microorganismos (Tchobanoglous et. Al., 1994)	25
4.3	Concentración de metales traza requeridos en la digestión anaerobia (Weiland y Rozzi, 1991)	27
4.4	Tiempos de retención celular para el diseño de digestores de lodos completamente mezclados (Metcalf y Eddy, 1991)	32
4.5	Carga recomendada en función de la concentración de sólidos y tiempo de retención hidráulico en digestores anaerobios de lodos (Metcalf y Eddy, 1991)	32
4.6	Condiciones ambientales optimas y de operación durante la digestión anaerobia de lodos de purga (Malina y Pohland,	33

	1992)	
5.1	Condiciones de operación	38
5.2	Parámetros analizados para el monitoreo del funcionamiento del digestor	38
6.1	Datos promedio obtenidos en el lodo biológico de alimentación de los digestores M1 y T1	41
6.2	Datos promedio obtenidos en el lodo fisicoquímico de alimentación en los digestores M2 y T2	41
6.3	Condiciones promedio de operación de los digestores	62

## LISTA DE FIGURAS

No. Figura	Descripción	Página
4.1	Ruta metabólica de la digestión anaerobia (adaptada de Guier y Zehnder, 1983)	23
4.2	Digestores anaerobios, a) baja tasa y b) alta tasa	28
4.3	Digestor con forma clásica	29
4.4	Digestor con forma americana	29
4.5	Digestor con forma europea	30
4.6	Digestor en forma de huevo	31
5.1	a) Modelo del digestor termofilico, b) Modelo del digestor mesofilico	34
5.2	Diagrama del intercambiador de calor en los digestores termofilicos	36
6.1	Evolución del pH y alcalinidad en el digestor M1	42
6.2	Evolución de la relación de alcalinidades en M1	43
6.3	Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en M1	43
6.4	Evolución del pH y alcalinidad en el digestor M2	44
6.5	Evolución de la relación de alcalinidades en M2	45
6.6	Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en M2	45
6.7	Evolución del pH y alcalinidad en el digestor T1	46
6.8	Evolución de la relación de alcalinidades en T1	47
6.9	Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en T1	47
6.10	Evolución del pH y alcalinidad en el digestor T2	48
6.11	Evolución de la relación de alcalinidades en T2	49
6.12	Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en T2	49
6.13	Composición y producción de biogás en el digestor M1	50
6.14	Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles	51

---

	con respecto al tiempo en el digestor M1	
6.15	Evolución de la carga orgánica eliminada en el digestor M1	51
6.16	Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor M1	52
6.17	Composición y producción de biogás en el digestor M2	53
6.18	Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles con respecto al tiempo en el digestor M2	53
6.19	Evolución de la carga orgánica eliminada en el digestor M2	54
6.20	Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor M2	55
6.21	Composición y producción de biogás en el digestor T1	56
6.22	Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles con respecto al tiempo en el digestor T1	56
6.23	Evolución de la carga orgánica eliminada en el digestor T1	57
6.24	Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor T1	58
6.25	Composición y producción de biogás en el digestor T2	59
6.26	Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles con respecto al tiempo en el digestor T2	59
6.27	Evolución de la carga orgánica eliminada en el digestor T2	60
6.28	Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor T2	61

---

**NOMENCLATURA**

AGV's	Ácidos grasos volátiles
Alfa ( $\alpha$ )	Relación de alcalinidades
AME	Actividad metanogénica específica
APHA	American public health association
CF	Coliformes fecales
DGCOH	Dirección general de construcción y operación hidráulica
DQO	Demanda química de oxígeno
EPA	Environmental protection agency
ESD	Digestor en forma de huevo (Egg Shaped Digester)
HH	Huevos de helminto
M1	Bioreactor mesofílico No. 1
M2	Bioreactor mesofílico No. 2
NMP	Número más probable
OHPA	Bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno
PFRP	Processes that further reduce pathogens
PSRP	Processes that significantly reduce pathogens
PTAR-CE	Planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de la Estrella
PTAR-SPA	Planta de tratamiento de aguas residuales de San Pedro Atocpan
RSV	Fracción de remoción de sólidos volátiles
SSF	Sólidos suspendidos fijos
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
T1	Bioreactor termofílico No. 1
T2	Bioreactor termofílico No. 2
TPA	Tratamiento primario avanzado
TPN	Condiciones de temperatura y presión normales (0°C, 1atm)
TRC ( $\theta_c$ )	Tiempo de retención celular
TRH ( $\theta$ )	Tiempo de retención hidráulico

UASB	Reactor anaerobio de flujo ascendente y lecho de lodos (Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket)
UFP	Unidad formadora de colonia

## RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló con el objeto de mejorar el proceso de digestión anaerobia y así obtener lodo tratado en condiciones adecuadas para ser dispuesto sin que este provoque alteraciones en el medio ambiente. Para ello se hizo una evaluación de los digestores basándonos en sus características principales, intentando a su vez mejorar la operatividad del reactor.

La experimentación se llevó a cabo a nivel laboratorio utilizando cuatro digestores de tipo en forma de huevo con capacidad de 5L de volumen útil. Los digestores fueron alimentados con lodos de purga provenientes de dos plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, una de tipo convencional (lodos activados) y otra de tipo primario avanzado. Dos de los reactores trabajaron en condiciones mesofílicas alimentados con diferente tipo de lodo, al igual que los dos reactores termofílicos.

El desarrollo experimental consistió en el análisis y evaluación de los biorreactores en funcionamiento, monitoreando algunos parámetros importantes para la digestión anaerobia del lodo, los cuales fueron comparados con la bibliografía.

Se llegó a la conclusión de que los biorreactores termofílicos no estaban trabajando a la temperatura adecuada y que tanto los biorreactores mesofílicos como los termofílicos sufrían de una deficiente agitación. Dada la falta de mezclado para este tipo de sistemas, se propone para el sistema de agitación un mezclador de tipo propela que mejorará la eficiencia de los reactores y con ello parte de los problemas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Evidentemente, con la normatividad aplicada a la descarga de aguas residuales han surgido necesidades como la de implementar una infraestructura adecuada para su tratamiento. Sin embargo, en la actualidad la mayor parte de los sistemas de tratamiento de aguas residuales no contemplan el manejo y la disposición de los lodos generados en dichos procesos, a pesar de que ya existe una normatividad que regula la situación. Como resultado, se desechan los lodos en rellenos sanitarios, tiraderos, alcantarillados, etc.

Anteriormente, en el grupo de trabajo se realizó una tesis en donde se llevó a cabo la inoculación y arranque de los digestores, además de la estabilización de los mismos, como inóculo se utilizó lodo anaerobio de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR) de Atlamaxac, Tlaxcala; M1 y T1 se alimentaron con lodo anaerobio traído de Atlamaxac, mientras que M2 y T2 de lodo de tratamiento primario avanzado el cual fue producido inicialmente en la PTAR de Ciudad Universitaria, después fue traído de la PTAR de San Pedro Atocpan (Rojas, 2001). La temperatura inicial para todos los reactores fue de 35 °C. En una segunda etapa del proyecto de investigación se procedió a cambiar el tipo de lodo de alimentación de los digestores M1 y T1, que era un lodo anaerobio predigerido proveniente de una planta del estado de Tlaxcala, por un lodo aerobio combinado (primario y secundario) proveniente de la purga de la planta de Cerro de la Estrella. M2 y T2 siguieron trabajando con lodo TPA (tratamiento primario avanzado) obtenido de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de San Pedro Atocpan. También se realizó la adaptación de lodos mesofílicos a termofilia, para una nueva inoculación de ambos digestores termofílicos. El objetivo de esta segunda etapa fue el de evaluar la factibilidad técnica de la aplicación de la digestión anaerobia termofílica para la estabilización de lodos biológicos y fisicoquímicos, provenientes de dos plantas operadas por la DGCOH, así como evaluar la reducción de microorganismos patógenos y parásitos que se encuentran presentes en estos lodos.



En la tesis que lleva por título *Remoción de parásitos (huevos del helmito) y patógenos (coliformes fecales) por digestión anaerobia de lodos en mesofilia termofilia* (Castro, 2001) se demostró la factibilidad técnica de la digestión anaerobia termofílica para la estabilización de los lodos, por lo que en el presente trabajo se evaluaron algunos factores que permiten establecer mejoras para el funcionamiento de digestores anaerobios de lodos tanto biológicos como de tratamiento primario avanzado y bajo condiciones de mesofilia y termofilia a nivel laboratorio. La investigación estuvo enmarcada en un convenio de colaboración entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Gobierno del Distrito Federal.

## 1.1 OBJETIVOS

### **Objetivo general.**

Evaluar los factores que permitan mejorar las características físicas y operacionales del tratamiento anaerobio de lodos bajo condiciones de mesofilia y termofilia a nivel laboratorio.

### **Objetivos específicos.**

- ❖ Evaluar las características físicas y operacionales de los digestores anaerobios.
- ❖ Proponer medidas físicas y operacionales que permitan incrementar la eficiencia del tratamiento de digestión anaerobia de lodos en mesofilia y termofilia.

---

## 2. MANEJO DE LODOS DE DESECHO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### 2.1 PROBLEMÁTICA DE LOS LODOS RESIDUALES EN EL DF.

La problemática en materia del manejo del agua que presenta actualmente el Distrito Federal (D.F.) y su área Metropolitana es debida al gran aumento de población, lo que lleva a una mayor consumo de agua, a la necesidad de tratarla y reutilizarla para poder liberar el consumo de la misma en su forma potable requerida por la población.

El tratamiento de aguas residuales es muy importante, ya que posibilita el reuso de estas aguas, evitando así la extracción exhaustiva del recurso y promoviendo la conservación del ambiente. Así como es importante tratar las aguas residuales, también es importante tratar los lodos de desecho generados en estos procesos, ya que el impacto ecológico puede ser muy severo. El lodo en su estado crudo (sin tratamiento previo) es susceptible a la putrefacción, desarrolla rápidamente olores fuertes y ofensivos, además de contribuir ampliamente al desarrollo de microorganismos patógenos y parásitos, así como otros vectores de enfermedades.

La creación de una normatividad que regula las descargas de aguas residuales a diversos cuerpos receptores, las características del agua residual tratada para reuso y a sistemas de alcantarillado público, ha traído consigo la necesidad de generar la infraestructura necesaria para su tratamiento. Tan sólo hace unos cuantos años México carecía de un marco normativo que regulara el manejo de los lodos residuales generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales; era así que una gran proporción de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales disponían los lodos en forma cruda o semitratada en tiraderos a cielo abierto, en rellenos sanitarios, además de ser vertidos en el sistema de alcantarillado, y hasta cuerpos de agua. Actualmente ya existe la NOM-004-

---

SEMARNAT-2002, *“Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final”*, que da la pauta para el manejo de este contaminante.

El manejo y disposición de lodos de desecho provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales sin una metodología adecuada, puede acarrear repercusiones negativas tanto al ambiente como a la salud pública, debido a sus características biológico-infecciosas.

## 2.2 NORMATIVIDAD EN MÉXICO

Actualmente la NOM-052-ECOL-1993, clasifica a los lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas residuales como residuos peligrosos biológico infecciosos (SEMARNAP, 1993). Como consecuencia, los organismos generadores de lodos deben considerar en sus costos de operación, el costo relacionado con la disposición de dichos lodos. Esto también imposibilita la recuperación de algunos compuestos útiles de los lodos, sobre todo de aquellos provenientes de procesos de tratamiento de aguas negras y algunas industriales. Para evitar esto, el Gobierno Federal a través de los principales organismos relacionados con el agua tales como la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua (CNA), Instituto Nacional de Ecología (INE), entre otras, y apoyados en organismos tales como la Universidad Nacional Autónoma de México, DGCOH, Secretaría de Salud, etc. ha emitido una serie de normas Oficiales Mexicanas que tienen la finalidad de regular las características de las aguas residuales que se vierten en aguas y bienes nacionales (NOM-001-ECOL-1995), y a sistemas de drenaje (NOM-002-ECOL-1997), así como las características de las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios con contacto humano indirecto y directo (NOM-003-ECOL-1997.)

La Normatividad descrita, sin embargo, no contempla las medidas y calidad necesarias para evitar los problemas que la disposición de los lodos generados en

las plantas de tratamiento implican en el caso de que no se traten de forma apropiada. Por esto, el Gobierno Federal ha emitido la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 que regula las características y aprovechamiento de los lodos tratados (biosólidos).

En esencia, la NOM-004-SEMARNAT-2002 establece los límites máximos permisibles para la disposición de los lodos de desecho tratados para reutilizar como fertilizantes o biosólidos. Esta norma se basa en la EPA (Environmental Protection Agency, 1996), la cual en su apartado 503 establece los requerimientos para el reuso y disposición de los lodos de desecho (biosólidos) cuando éstos:

- Son aplicados como fertilizantes para cultivos agrícolas u otro tipo de vegetación.
- Se descargan en un sitio de disposición final o,
- Son incinerados.

Adicionalmente, la regla 503 indica que los biosólidos podrán ser dispuestos en sitios de relleno sanitario municipal si se encuentran en las condiciones que indica la parte 40 CFR en el artículo 258. Dicho artículo establece la clasificación de los biosólidos en clase “A” y “B”, con respecto al nivel contenido de patógenos (tabla 2.1). En México se aplicó con algunas modificaciones y se definió una tercera clase “C” (tabla 2.2).

**Tabla 2.1.** Límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en biosólidos según regulaciones de la EPA.

Clase	Patógenos		Parásitos
	Coniformes fecales NMP/gr ST	Salmonella sp NMP/4gr ST	Huevos de helmintos Viables /4gr ST
A	Menos de 1,000	Menor de 3	Menor de 1
B	Menor de 2,000,000	NA	NA

NA = No Aplica

Fuente: EPA Apartado 503. Norma para el uso y disposición de los lodos de desecho, 1996, b.

**Tabla 2.2.** Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM- 004-SEMARNAT-2002).

Clase	Patógenos		Parásitos
	Coniformes fecales NMP/gr base seca	Salmonella sp NMP/gr base seca	Huevos de helmintos Viabiles /gr base seca
A	Menos de 1,000	Menor de 3	Menor de 1
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

Adicionalmente, la norma 503 fija límites para 10 metales y para controlar la atracción de vectores.

Varios procesos son aceptados por la regla 503 para la producción de biosólidos clase "A" o "B". Para la clase "A", los requerimientos de eliminación de patógenos se pueden obtener con una de las siguientes opciones:

- ❖ Tratamiento térmico de biosólidos
- ❖ Tratamiento de biosólidos en procesos con elevación del pH, temperatura alta y secado por aire
- ❖ Tratamiento de biosólidos con procesos de reducción adicional de patógenos (Processes that Further Reduce Pathogens: PFRP)
- ❖ Tratamiento de biosólidos en procesos equivalentes a PFRP, previo permiso de autoridades sanitarias
- ❖ Tratamiento de biosólidos con otros procesos, previa demostración de reducir virus entéricos a un nivel menor a una unidad formadora de colonia (UFP) por 4 gramos de sólidos totales de peso seco y huevos de helminto viables a nivel menor de 1 por 4 gramos de sólidos totales de peso seco, en adición a los límites de coliformes fecales o *Salmonella* sp. anteriormente mencionados.
- ❖ Tratamiento de biosólidos en procesos desconocidos o en condiciones de operación menos estrictas. En este caso la determinación de coliformes fecales

o *Salmonella* sp., virus entéricos y huevos de helminto viables podría darse en el momento de disposición o aplicación final.

Para la clase "B", los requerimientos de eliminación de patógenos se pueden obtener con una de las siguientes opciones:

- ❖ Monitoreo de organismos indicadores por dos semanas antes de su disposición. Los coliformes fecales deben estar en niveles menores a dos millones NMP por gramo de sólidos totales peso seco.
- ❖ Tratamiento de biosólidos en procesos de reducción significativa de patógenos (Processes that Significantly Reduce Pathogens: PSRP).
- ❖ Tratamiento de biosólidos en proceso equivalentes a un PSRP, si es aprobado por las autoridades competentes.

Adicionalmente, hay restricciones de sitio para los biosólidos de clase "B" cuando son aplicados al suelo dependiendo del tipo de cultivo o exposición pública. Los tiempos permitidos para cosechas o acceso al público varían de treinta días a dos años después de la aplicación de los biosólidos.

Los límites máximos permisibles para lodos en función del contenido de metales pesados y sus tasas acumulativas máximas permitidas establecidas por la US EPA se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Límites máximos permisibles para lodos en función del contenido de metales pesados y sus tasas acumuladas máximas permitidas (EPA, 1996b).

**Tabla 2.3.** Límites máximos permisibles

Contaminante	Para la aplicación en césped o jardines de casas habitación (mg/kg base seca)	Para aplicación en agricultura y sitios de recreación pública (mg/kg base seca)	Tasas acumuladas máximas permitidas (mg/kg base seca)
Arsénico	41	75	41
Cadmio	39	85	39
Cromo	1200	3000	3000
Cobre	1500	4300	1500
Plomo	300	840	300
Mercurio	17	57	17
Molibdeno	-	75	-
Níquel	420	420	420
Selenio	100	100	100
Zinc	2800	7500	2800

En la NOM-004-SEMARNAT-2002, también se especifican los límites permisibles para los azolves y lodos en función del contenido de metales pesados y sus tasas acumulativas máximas permitidas (tabla 2.4).

**Tabla 2.4.** Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes (mg/kg base seca)	Buenos (mg/kg base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Los procesos aceptados para la producción de biosólidos clase "A" (PFRP) son: composteo, secado por calor, tratamiento por calor, digestión aerobia termofílica, irradiación con rayos beta, irradiación con rayos gama y pasteurización. Para los biosólidos clase "B", los PSRP son: digestión aerobia, secado por aire, digestión anaerobia, composteo sin un estricto control de la temperatura, y la estabilización con cal. La digestión anaerobia termofílica aun no esta considerada en la lista de

la EPA; sin embargo una instalación específica puede ser aprobada si cumple con los criterios antes mencionados, de acuerdo con un programa de monitoreo aceptado por las autoridades pertinentes.

La regulación mexicana para biosólidos es indudablemente un impulso para alcanzar el tratamiento de lodos de desecho y su aplicación controlada en los campos será una vía de descomposición final más favorable que toma consideraciones ecológicas y económicas. En esta perspectiva, los procesos biológicos podrían tomar una gran importancia en el mercado para la instalación de plantas de composta o digestión (anaerobia o aerobia).



### 3. TRATAMIENTO DE LODOS DE DESECHO

Los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales constituyen una importante fuente de contaminantes, ya que contienen microorganismos (patógenos y parásitos), además de contener compuestos orgánicos e inorgánicos, inclusive tóxicos, susceptibles de iniciar su putrefacción, con los problemas derivados. Los lodos resultan ya sea de la simple separación de la fase sólida de la líquida (procesos de sedimentación y flotación), conocidos como lodos primarios, o bien los formados a partir de procesos biológicos, identificados como lodos secundarios (Ramalho, 1983).

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS LODOS RESIDUALES.

Los lodos producidos durante el tratamiento de aguas residuales son generados en distintos puntos del tren de tratamiento y se forman de acuerdo con los procesos que se apliquen en el mismo. Existen procesos biológicos y fisicoquímicos para el tratamiento de aguas residuales, además de las operaciones de pretratamiento, es por ello que se realiza la siguiente clasificación:

- 1) Los generados por fenómenos físicos, como la sedimentación o flotación:
  - a) Lodos primarios, procedentes de la sedimentación primaria (partículas fácilmente sedimentables de naturaleza orgánica e inorgánica).
- 2) Los que se generan mediante procesos biológicos;
  - a) Lodos secundarios o biológicos, procedentes de la sedimentación secundaria, consisten fundamentalmente en biomasa de exceso.
  - b) Lodos combinados, producto de la mezcla de lodos primarios y secundarios.
- 3) Los generados en procesos fisicoquímicos;

- a) Lodos generados por la coagulación y sedimentación de las aguas y desechos industriales, con sulfato de aluminio o cloruro férrico.
- b) Lodos de precipitación de las plantas de ablandamiento y del tratamiento de desechos industriales.

La composición de los lodos varía según sea su origen, dependiendo del tipo de efluente industrial o urbano tratado. En la tabla 3.1, se presenta la composición química típica de lodos crudos y digeridos.

**Tabla 3.1** Composición química de lodos crudos y digeridos (López, 2000)

Parámetro	Lodos primarios crudos		Lodos digeridos	
	Intervalo	Valor típico	Intervalo	Valor típico
Sólidos totales (ST, %)	2.0 – 7.0	4.0	6.0 – 12.0	10.0
Sólidos volátiles (%ST)	60 – 80	65.0	30 – 60	40.0
Grasas y aceites (soluble en éter %ST)	6.0 – 30.0	-	5.0 – 20.0	-
Proteínas (%ST)	20 – 30	25.0	15 – 20	18.0
Nitrógeno (N, %ST)	1.5 – 4.0	2.5	1.6 – 6.0	3.0
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %ST)	0.8 – 2.8	1.6	1.5 – 4.0	2.5
Potasio (K <sub>2</sub> O, %ST)	0.0 – 1.0	0.4	0.0 – 3.0	1.0
Celulosa (%ST)	8.0 – 15.0	10.0	8.0 – 15.0	10.0
Hierro (no como sulfuro)	2.0 – 4.0	2.5	3.0 – 8.0	4.0
Sílice (SiO <sub>2</sub> , %ST)	15 – 20	-	10 – 20	-
pH	5.0 – 8.0	6.0	6.5 – 7.5	7.0
Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	500 – 1500	600	2500-3500	3000
Ácidos orgánicos (mg/l HAc)	200 – 2000	500	100 – 600	200
Poder calorífico (BTU/lb)	6800-1000	7600 <sup>(a)</sup>	2700-6800	4000 <sup>(b)</sup>

Nota: (a) Basado en 65% de materia volátil. (b) Basado en 40% materia volátil.

Además de las características antes mencionadas es importante conocer las propiedades reológicas ya que es de vital interés para el bombeo, tuberías y transporte de los lodos. Dichos lodos a partir de cierta concentración de ST, tienen la propiedad de solidificarse en ausencia de agitación y transformarse en líquidos aplicando una ligera agitación, a esta propiedad se le llama tixotropía (López., 2000).

Para el presente estudio, son de mayor interés los lodos que se producen en el proceso biológico, ya que es la principal vía de tratamiento de aguas residuales municipales. Los lodos biológicos crudos suelen ser líquidos, con concentraciones que dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento empleados, pueden variar de 0.25 al 2% de sólidos en peso (Metcalf & Eddy, 1991). Los lodos producidos en el proceso fisicoquímico son de interés por la creciente aceptación que está teniendo esta vía de tratamiento. Estos lodos suelen ser más densos y con mayores concentraciones de sólidos.

Los lodos generados a partir de un proceso biológico, se componen principalmente por materia orgánica contenida en las aguas residuales en forma de biomasa. De forma particular, los lodos provenientes de un reactor convencional de lodos activados, tienen generalmente una apariencia floculenta de color marrón. Un color muy oscuro en los lodos es señal de que éstos están próximos a entrar en condiciones sépticas; por otro lado, una tonalidad muy clara acompañada de una lenta sedimentación es señal de que tuvieron una aireación insuficiente. Los lodos generados a partir de un sistema de lodos activados tienen un característico olor a tierra húmeda que no es molesto, sin embargo, tienden a adquirir condiciones sépticas muy rápidamente, generando entonces un olor putrefacto muy desagradable. Por lo general estos se digieren solos o combinados con lodos primarios frescos.

La densidad relativa de los lodos de purga de un sistema de lodos activados es aproximadamente de 1.015, con una densidad relativa de sólidos de 1.3, dichos lodos se presentan en concentraciones de 0.6 a 2% de ST.

Los lodos fisicoquímicos son producidos por sistemas de tratamiento, tales como precipitación química o filtración. Las características del lodo dependen de los procesos de tratamiento aplicados. Los lodos químicos resultan de procesos de tratamiento con químicos, tales como cal, polímeros orgánicos y sales de hierro y aluminio (López, 2000). El lodo precipitado químicamente con sales metálicas es de color oscuro, a veces rojo superficialmente cuando hay mucho hierro. El lodo de cal es gris-marrón grasoso. Su olor no es tan desagradable como el del lodo primario, generalmente gelatinosos por los hidróxidos de hierro y aluminio (Romero, 1999; Metcalf & Eddy, 1991).

Según sean sus características fisicoquímicas, los lodos residuales pueden clasificarse en: orgánico hidrófilo, aceitosos, mineral hidrófobo, mineral hidrófilo, fibroso.

### **3.2 TRATAMIENTO DE LODOS.**

La integración de los procesos de tratamiento para lodos depende de la procedencia, características fisicoquímicas y cantidad de sólidos presentes, así como de la disposición final. Entre los principales componentes de los procesos de tratamiento de lodos residuales se encuentran:

- ❖ Espesamiento
- ❖ Estabilización
- ❖ Acondicionamiento para la deshidratación
- ❖ Deshidratación
- ❖ Disposición final

---

El **espesamiento** es un proceso que se emplea para aumentar el contenido de sólidos en los lodos por eliminación de una parte de la fracción líquida. Es una operación necesaria para procesos de tratamiento posteriores a la misma, como lo es la digestión, deshidratación y secado. El espesamiento logra lo siguiente:

- Optimiza tanto el volumen de los reactores correspondientes a procesos subsecuentes, como de los equipos empleados para el funcionamiento de los mismos.
- Reduce la cantidad de reactivos químicos necesarios para el acondicionamiento de los lodos.
- Reduce del calor necesario para la digestión anaerobia.

Los métodos más comunes para el espesamiento de lodos son el espesamiento por gravedad y por flotación.

El espesamiento por gravedad está basado en el comportamiento de partículas suspendidas en operaciones de sedimentación y de compactación, dependiendo básicamente de su naturaleza y concentración. La concentración máxima de sólidos que se puede obtener en un espesador por gravedad es del 10% (Qasim, 1994).

El espesamiento por flotación es más eficiente para los lodos ligeros, como los que provienen de procesos de lodos activados o filtros percoladores. Las concentraciones máximas que pueden obtenerse en un espesador de flotación varían entre el 4 y 5% (Qasim, 1994). Los lodos pesados como los obtenidos de sedimentadores primarios, o los lodos combinados (donde la fracción de primarios es mayor) deben manejarse preferentemente por gravedad.

En el espesamiento por centrifugación, el espesado de lodos se lleva a cabo bajo la influencia de fuerzas centrífugas, su aplicación es muy limitada y se emplea principalmente para lodos de purga producidos en sistemas biológicos.

Normalmente requieren adición de polímeros. Las concentraciones máximas que se pueden obtener en un espesador de este tipo varían entre el 5 y 8% (Qasim, 1994). Las centrifugas se utilizan, tanto para el espesado como para la deshidratación de lodos.

La **estabilización de lodos** se realiza con la finalidad de reducir la concentración de patógenos, eliminar olores indeseables e inhibir, reducir o eliminar el potencial de putrefacción. Entre los procesos más comunes para lograr los objetivos mencionados se encuentran: la estabilización con cal, la digestión anaerobia y aerobia, lagunas, composteo, pasteurización, secado y/o incineración.

La estabilización con cal consiste esencialmente en aplicar al lodo dosis suficientes de cal para elevar el pH y la temperatura en el residuo durante el tiempo de contacto necesario para crear un medio termofílico fuertemente alcalino, desfavorable para la actividad de los microorganismos. Su aplicación hace que el lodo estabilizado presente condiciones favorables para su disposición en tierra, siempre y cuando se trate de suelos ácidos.

La digestión anaerobia es fundamentalmente un proceso de degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno con la conversión a metano y dióxido de carbono. Existen básicamente dos variantes de digestores anaerobios de alta y de baja tasa.

Los digestores de baja tasa conocidos también como convencionales, son aquellos en los cuales el proceso se lleva a cabo sin calentamiento ni mezclado, lo que favorece la estratificación del fluido, propiciando que la actividad biológica se lleve a cabo en aproximadamente el 50% del volumen del reactor. Su aplicación principal se encuentra generalmente en plantas pequeñas (López, 2000; Romero, 1999).

Una mejora al funcionamiento de este tipo de reactores consiste en la introducción de mezclado y de calentamiento, lo que permite una mayor carga de alimentación, al favorecer la transferencia de masa en el digestor y emplear todo el volumen del líquido en la reacción. A esta variante se le conoce como alta tasa.

En los digestores de alta tasa, se aplica un mezclado al medio de la reacción, ya sea mediante agitación mecánica, por recirculación de gas o de líquido o una combinación de ambos. Esta variante cuenta con un sistema de calentamiento que lleva la temperatura del digestor entre 30 y 40°C (digestión mesofílica).

La digestión aerobia consiste en la degradación de residuos biológicos en presencia de oxígeno, permitiendo un tiempo de contacto suficiente entre los organismos aerobios y la materia biodegradable. Cuando el sustrato externo se ha agotado, los microorganismos comienzan a consumir sus reservas internas (sustrato endógeno) a fin de obtener energía suficiente para mantener las reacciones de supervivencia. Su operación es relativamente sencilla comparada con los sistemas anaerobios; no genera malos olores y forma un producto final biológicamente estable. Cuando se trata una mezcla de lodos primarios y secundarios es importante considerar que los primeros, aunque de naturaleza primordialmente orgánica, contienen poca biomasa activa y, por lo tanto, constituyen una fuente importante de sustrato exógeno para los microorganismos contenidos en los lodos secundarios. En estos casos es necesario proporcionar mayores tiempos de retención celular.

La incineración, con el control adecuado de emisiones a la atmósfera, es un proceso efectivo debido a que se lleva a cabo la eliminación de los olores, oxida la materia orgánica, destruye todos los patógenos y sólo produce cenizas. La composición del lodo es una importante variable en este proceso, no sólo en su valor calorífico (kJ/kg de sólidos secos), sino también en la concentración de metales pesados. Ciertos contaminantes pueden ser emitidos en los gases de combustión y crear problemas en la calidad del aire.

El composteo es la degradación aerobia de materia orgánica, con un limitado contenido de humedad. Esta se lleva a cabo con lodos que contienen alrededor de 80% humedad, el oxígeno es suministrado por agitación o por venteo a través de la masa de lodo. En este último caso es necesario agregar agentes que eviten el apelmasamiento de los lodos con el objetivo de proveer intersticios para el flujo de aire. Ya que el composteo es un proceso aerobio es una operación exotérmica, por lo que el calor generado provoca la destrucción de organismos patógenos.

El uso de radiación de energía para la **desinfección** de lodos ha mostrado ser eficiente en la destrucción de patógenos, aunque no estabiliza la materia orgánica. Se emplean dos tipos de radiación: la beta y la gama. Aunque efectivos, no son realmente utilizados dado el alto costo de esta tecnología y el riesgo asociado.

En la pasteurización la temperatura se eleva hasta los 70°C durante 30 minutos, permitiendo con esto la inactivación de organismos patógenos y parásitos. Los dos métodos que se emplean para la pasteurización de lodos son la inyección directa de vapor y el intercambio indirecto de calor; aunque también se puede aplicar la digestión aerobia termofílica en combinación con la digestión anaerobia para lograr este fin (digestión en dos fases) (Metcalf & Eddy, 1991).

Tomando como referencia lo mencionado anteriormente, los tratamientos más frecuentes en la estabilización de lodos son la digestión anaerobia y la estabilización con cal, aunque esta última tiene un inconveniente muy importante; dado que el lodo tiene un elevado pH se restringe su reuso. Por tal motivo, en muchos casos la opción más eficaz es la digestión anaerobia para lo cual se está desarrollando el presente estudio.

Los métodos más comunes de **acondicionamiento** previo a una deshidratación son la adición de químicos y el tratamiento por calor. El acondicionamiento se realiza mediante la aplicación de compuestos orgánicos de cadenas largas y altos



---

pesos moleculares, llamados polielectrolitos. Con ello ha mejorado la deshidratación en filtros banda. Estos compuestos tienen grupos cargados positiva y negativamente a lo largo de sus cadenas, de manera que son capaces de desorber el agua de las partículas sólidas del lodo.

El sistema de **deshidratación** adecuado está en función del caudal de lodo, de los recursos económicos, del espacio y del personal disponible entre otros factores. Con base en su eficiencia y amplia aplicación, normalmente se recomiendan los filtros prensa y los filtros banda para llevar a cabo la deshidratación mecánica. Los primeros se refieren para caudales menores, principalmente por su operación intermitente.

Los lechos de secado son el método más antiguo para la deshidratación de lodos y se utilizan principalmente para la deshidratación de lodos digeridos en plantas de tratamiento pequeñas. El lodo se extiende en capas sobre la arena y se deja secar; el lodo se deshidrata por drenaje a través de la masa de lodo y de arena, y por evaporación desde la superficie expuesta al aire (Metcalf & Eddy, 1991). El contenido de humedad después de 10 a 15 días, en condiciones favorables, es de alrededor del 60%. Este método no es recomendable para lodos no digeridos, ya que pueden generar problemas asociados con malos olores. Las principales ventajas de este proceso son su bajo costo tanto de inversión inicial como de operación, así como la alta concentración de sólidos en los lodos deshidratados.

Las lagunas de secado se pueden emplear en lugar de los lechos de secado. Este método se aplica solo cuando se tiene disponibilidad de terreno y se recomienda para lodos estabilizados con objeto de evitar malos olores. El principal mecanismo responsable de la deshidratación es la evaporación del agua contenida en los lodos, por lo que su mejor aplicación se da en zonas donde las condiciones climáticas favorezcan este efecto. El lodo se descarga a la laguna en capas y después de varios meses de exposición, se retira mecánicamente con un contenido de sólidos que varía entre el 25 y 30% (Metcalf & Eddy, 1991).

La **disposición final en relleno sanitario** consiste en depositar los residuos en sitios debidamente controlados y operados, ubicados en áreas alejadas de lagos, estanques, ríos, pozos para suministro de agua, carreteras, aeropuertos y zonas habitadas, compactándolos y cubriéndolos con tierra. En este caso es importante que los lodos estén bien deshidratados para evitar que propicien la formación de lixiviados.

El uso de lodos tratados como **mejoradores de suelos**, es una alternativa que actualmente está tomando gran importancia, debido a su contenido de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, además de otros micronutrientes tales como manganeso, cobre, molibdeno, hierro y zinc. A pesar de que los nutrientes no se encuentran en la proporción de cualquier fertilizante balanceado, la mayoría de los cultivos agrícolas responden favorablemente a la aplicación del lodo.

De acuerdo con las características del lodo se determina la operación unitaria o proceso de tratamiento que más convenga, en función del tipo de disposición o reuso que se le deba dar. Los parámetros regulados determinan si el lodo puede ser reutilizado o se le da un confinamiento final.

## 4. DIGESTIÓN ANAEROBIA

### 4.1 GENERALIDADES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Hasta hace pocos años, la digestión anaerobia era vista como una opción poco adecuada para el tratamiento de efluentes industriales o municipales, principalmente por el desconocimiento que existía acerca de los mecanismos que rigen este proceso.

A la fecha, el desarrollo de la biotecnología anaerobia ha permitido que se coloque en una posición de igualdad y en muchos casos hasta en superioridad en eficiencia de remoción de materia orgánica con respecto a otros sistemas de tratamiento. Adicionalmente, el consumo reducido de electricidad, así como el valor del metano producido, hacen del tratamiento anaerobio sea un candidato atractivo al momento de efectuar una selección.

En general, los procesos anaerobios presentan un importante número de beneficios contra pocos inconvenientes o desventajas en comparación con otros tratamientos. Estos son resumidos en la tabla 4.1.

Una de las principales ventajas del tratamiento anaerobio, es el representar un importante ahorro económico principalmente en operación y mantenimiento.

**Tabla 4.1** Ventajas y desventajas del proceso de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales y lodos de desecho ( Lettinga *et. al.*, 1980; II, Cabirol *et al.*, 1999).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de la masa y el volumen del lodo mediante la conversión a metano, bióxido de carbono y agua. Esta reducción se encuentra entre el 25 y 45% de ST.</li> <li>- Bajos requerimientos de nutrientes.</li> <li>- El biogás producido es un gas combustible que convierte a la digestión anaerobia en un proceso productor neto de energía.</li> <li>- No hay requerimientos de energía para la aireación.</li> <li>- Los lodos digeridos, por su estabilidad y características fisicoquímicas, pueden ser aprovechados como mejoradores de suelos en una gran variedad de situaciones o bien por regla general pueden ser fácilmente deshidratados para su disposición final.</li> <li>- Pueden aplicarse cargas orgánicas muy altas bajo condiciones favorables.</li> <li>- El lodo anaerobio activo puede ser preservado sin alimentación por varios meses.</li> <li>- Los compuestos valiosos como amonio (<math>\text{NH}_4^+</math>) son conservados en este tratamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costos de inversión inicial altos.</li> <li>- Las bacterias anaerobias particularmente metanogénicas, son muy sensibles.</li> <li>- Requieren relativamente largos periodos de tiempo para el arranque del proceso, aunado a un mayor factor de sobre diseño para aceptar sobrecargas orgánicas.</li> <li>- En el caso particular de México, muy poca, o prácticamente nula experiencia en el diseño, construcción y operación de digestores anaerobios para lodos de purga.</li> </ul>

En el proceso de digestión anaerobia se encuentran presentes tanto microorganismos anaerobios estrictos como facultativos, los cuales degradan la materia orgánica en compuestos más simples como metano y bióxido de carbono. En contraste con la oxidación aeróbica, esta conversión a  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , rinde relativamente, pequeñas cantidades de energía a los microorganismos. Por lo anterior su velocidad de crecimiento es lenta y sólo una pequeña porción de desechos es convertida a células nuevas, la mayor porción de materia se transforma a bióxido de carbono y metano. Estos compuestos son parcialmente

insolubles en el medio, y una vez formados escapan de éste, pudiendo colectarse en su conjunto y quemar el metano para obtener energía por calentamiento, generación de electricidad o generación de vapor.

#### 4.2 ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

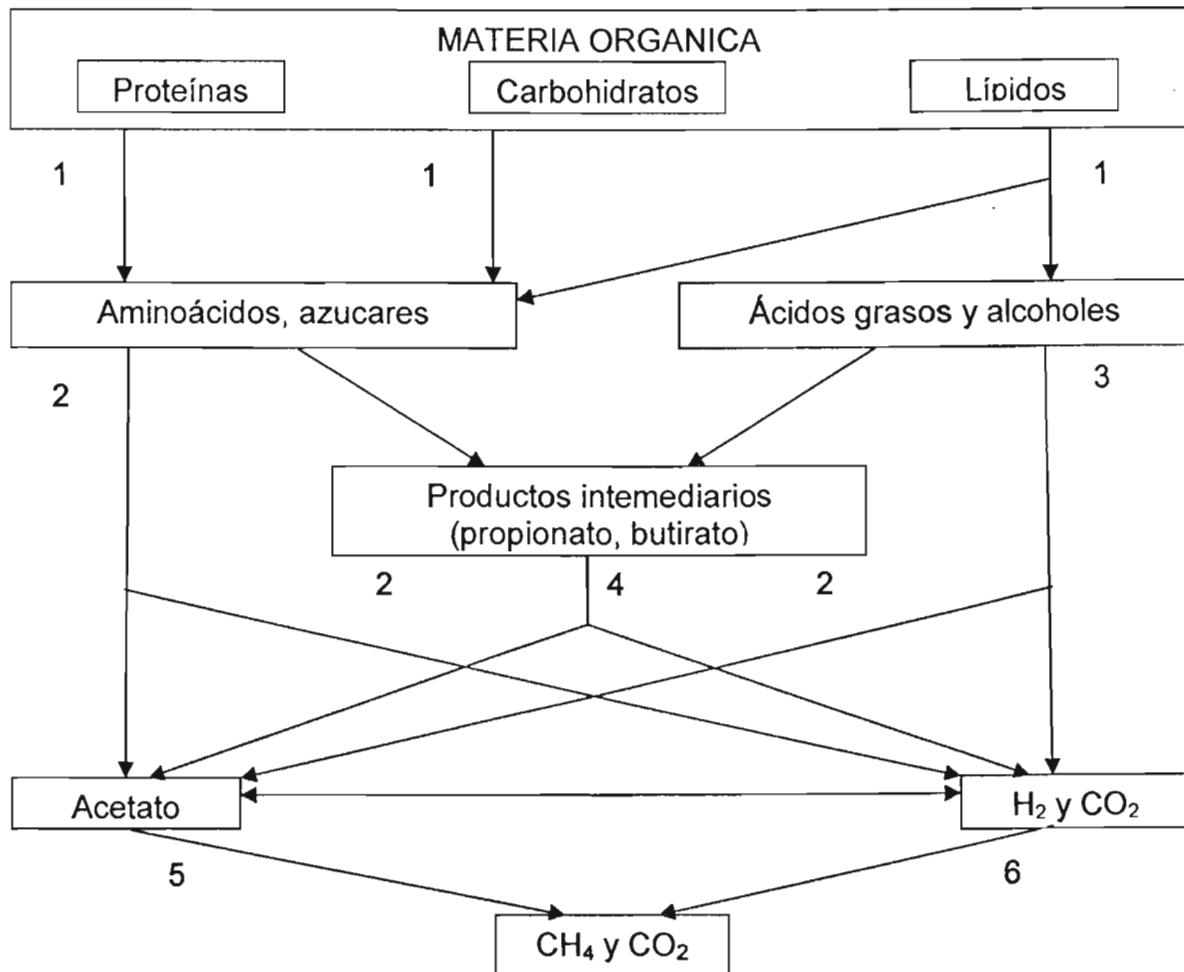
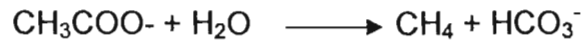
La digestión anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y es el resultado de la asociación simbiótica de diferentes tipos de microorganismos, cada uno de los cuales lleva a cabo el proceso bioquímico que le reporte el mayor rendimiento energético bajo estas condiciones; el metano y dióxido de carbono son el resultado final de este proceso.

En la figura 4.1 se observa la secuencia de reacciones propuesta por Gujer y Zehnder (1993), en donde se indica que los compuestos como las proteínas, carbohidratos y lípidos son hidrolizados por enzimas extracelulares a compuestos más simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Posteriormente los azúcares y aminoácidos son utilizados como sustrato por organismos fermentadores, mientras que los ácidos grasos son asimilados por oxidadores anaerobios; esto da como producto acetato, hidrógeno y productos intermedios como el propionato y butirato. Los productos intermedios, son degradados hasta acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias conocidas como bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno (OHPA, por sus siglas en inglés), estas bacterias están en relación sintrófica con las bacterias metanogénicas que utilizan hidrógeno. El acetato e hidrógeno producidos son finalmente el sustrato de las bacterias metanogénicas, las cuales se dividen en dos grupos tróficos:

- ◆ Bacterias metanogénicas hidrogenofílicas, que utilizan el hidrógeno producido para reducir el  $\text{CO}_2$  en  $\text{CH}_4$



- ◆ Bacterias metanogénicas acetoclasticas, que transforman el acetato en metano. Estas bacterias contribuyen con el 70% del metano producido en los digestores.



**Figura 4.1** Ruta metabólica de la digestión anaerobia (adaptada de Gujer y Zehnder, 1983).

Todas las reacciones anteriores se pueden resumir en seis procesos de conversión:

- 1) Hidrólisis de proteínas, carbohidratos y lípidos
- 2) Fermentación de azúcares y aminoácidos
- 3) Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes, conocida como  $\beta$ -oxidación.
- 4) Oxidación anaerobia de ácidos grasos volátiles intermediarios (excepto acetato)
- 5) Conversión de acetato a  $\text{CH}_4$ , conocida como metanogénesis acetoclástica
- 6) Conversión de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$ , que se conoce como metanogénesis reductora.

Debe distinguirse en este caso entre agua residual y lodo de purga, ya que el substrato para el primero se encuentra en forma soluble, mientras que el lodo contiene, en mayor proporción, material orgánico particulado que requiere ser hidrolizado por enzimas extracelulares.

### 4.3 ASPECTOS FISICOQUÍMICOS

Los principales factores ambientales que inciden en un proceso anaerobio para el tratamiento de un agua residual, están relacionados con aquellos parámetros cuyo control permite un buen crecimiento de la biomasa y por consiguiente una mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica y en la producción de biogás.

Uno de los aspectos más importantes en el conocimiento de estos factores, es el poder evitar cualquier falla en el proceso y tomar a tiempo medidas correctivas necesarias cuando así se requiera.

**Temperatura:** Los microorganismos y por consecuencia las constantes de equilibrio, se ven afectadas en gran medida por un cambio de temperatura, provocando desplazamientos en los valores de varios parámetros. Se ha observado que existen principalmente tres intervalos de temperatura en la cual se desarrollan cierto tipo de microorganismos (tabla 4.2).

**Tabla 4.2** Rangos típicos de temperatura para diversos microorganismos (Tchobanoglous *et. al.*, 1994).

Condición	Temperatura °C	
	Rango	Optimo
Psicrófilicos <sup>a</sup>	-10 – 30	15
Mesofílicos	20 – 50	35
Termofílicos	45 – 75	55

a. También llamados criofílicos.

**pH:** La digestión anaerobia puede llevarse a cabo dentro de un intervalo de pH comprendido entre 6.8 a 7.4, siendo el óptimo entre 7.0 y 7.2. A un pH de 6.2 las bacterias metanogénicas son severamente afectadas (Noyola, 1998) y a pH alcalinos son afectadas principalmente las bacterias metanogénicas acetoclásticas (Malina, 1992).

**Alcalinidad:** La alcalinidad es la capacidad amortiguadora de un sistema para mantener un determinado pH mediante el sistema ácido-base. Debido a que las bacterias acidogénicas poseen una mayor actividad que las bacterias metanogénicas, ante sobrecargas orgánicas son capaces de provocar la acidificación del reactor, esto puede evitarse manteniendo en el digestor una óptima capacidad amortiguadora (buffer). La alcalinidad útil para fines de amortiguamiento del pH es la debida a los bicarbonatos; la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles (AGV's) es una forma indirecta de medir su concentración, la cual debe mantenerse al nivel más bajo posible. Un criterio para verificar si la carga orgánica suministrada al digestor es la adecuada para este proceso anaerobio, es la relación  $\alpha$ . Ésta se calcula con el consumo de ácido hasta un pH de 5.75 después hasta 4.3 (Jenkins *et. al.*, 1983).

$$\alpha = \frac{Alc(HCO_3^-)_{5.75}}{Alc(total)_{4.3}}$$



El valor de  $\alpha$  durante el arranque deberá mantenerse arriba de 0.5. Un valor superior a 0.7 muestra una operación estable, pudiéndose incrementar la carga del digestor (Noyola, 1994).

Por su parte, la alcalinidad debida a los AGV se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$Alc(AGV) = Alc(total)_{4.3} - Alc(HCO_3^-)_{5.75}$$

En donde:

$Alc(HCO_3^-)_{5.75}$  = es la alcalinidad debida a los bicarbonatos, calculada con el consumo de ácido necesario para llevar el pH original a 5.75

$Alc(total)_{4.3}$  = es la alcalinidad total calculada con el consumo de ácido necesario para llevar el pH original a 4.3

$Alc(AGV)$  = alcalinidad debida a los AGV

**Nutrientes:** La digestión anaerobia por ser un proceso biológico requiere de ciertos nutrientes inorgánicos esenciales para el crecimiento de la biomasa. Además de nitrógeno, fósforo y azufre, también se requieren otros micronutrientes como níquel, cobalto, hierro y molibdeno (tabla 4.3).

Para que el reactor opere adecuadamente se debe cuidar que los nutrientes se encuentren en ciertas proporciones; comúnmente se ha recomendado una relación de DQO:N entre 400:7 a 1000:7 para cargas orgánicas altas y bajas respectivamente; de igual manera es recomendada una relación N:P de 7:1 (Malina, 1992).

**Tabla 4.3** Concentración de metales traza requeridos en la digestión anaerobia (Weiland y Rozzi, 1991).

Elemento	Concentración del metal, mg/l	
	a 10 gDQO/l	a 50 gDQO/l
Fe	0.5 – 20	3 – 100
Ni	0.05 – 3	0.3 – 15
Co	0.05 – 2	0.3 – 10
Mo	0.01 – 0.05	0.05 – 0.2

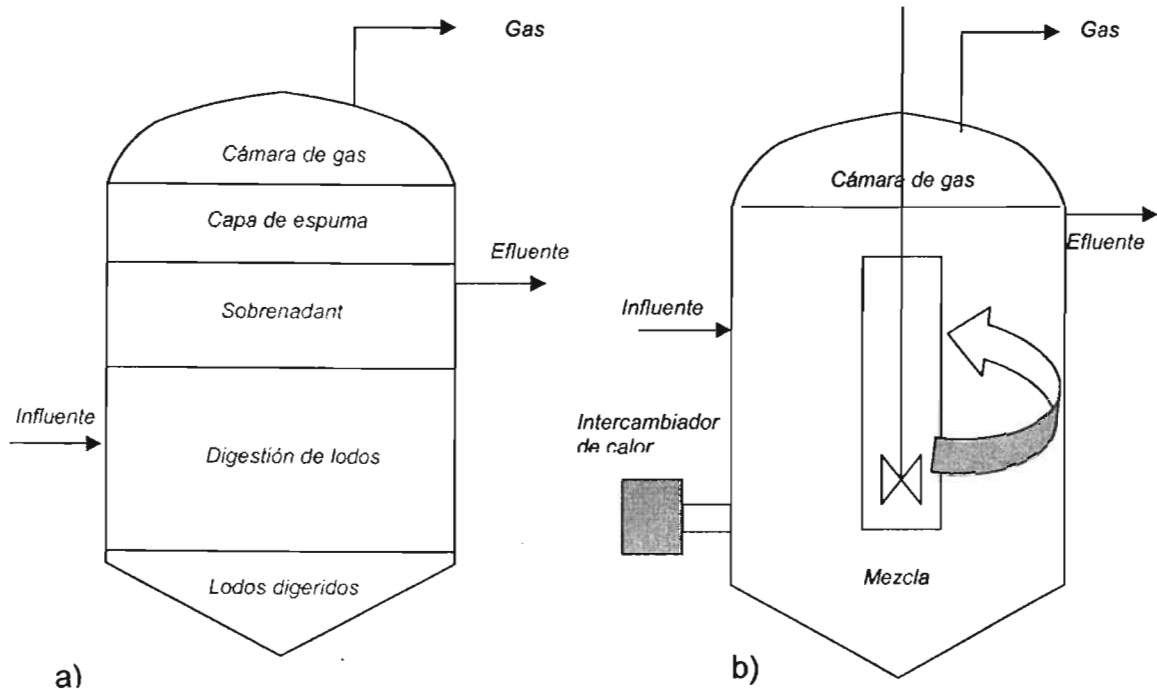
#### 4.4 DIGESTORES ANAEROBIOS DE LODOS

Las principales tecnologías utilizadas para la remoción de materia orgánica vía digestión anaerobia se pueden agrupar en dos tipos (figura 4.2):

- Digestores de baja tasa.
- Digestores de alta tasa.

**Digestores de baja tasa:** Este proceso, conocido también como convencional, se lleva a cabo en un tanque sin mezclado y sin calentamiento. La estratificación del contenido del reactor hace que aproximadamente solo en el 50% del volumen se lleve a cabo la actividad biológica. Su aplicación ya es muy limitada o se da principalmente en plantas pequeñas.

**Digestores de alta tasa:** En este caso se aplica un mezclado al medio de reacción, ya sea mediante agitación mecánica, por la recirculación de gas o líquido, o una combinación de ambos; además esta variante cuenta con sistema de calentamiento.



**Figura 4.2** Digestores anaerobios, a) baja tasa y b) alta tasa

#### 4.5 GEOMETRÍAS DE DIGESTORES ANAEROBIOS

En la geometría de un digestor de lodos intervienen factores como el mezclado, la generación de zonas muertas y la acumulación de sólidos en alguna parte del digestor.

Las geometrías más utilizadas para digestores anaerobios de lodos son la clásica, americana, europea y en forma de huevo.

La **forma clásica** (figura 4.3), consiste en un cilindro (diámetro:altura = 1) con pendientes en la parte superior e inferior. La pendiente en las paredes de la parte superior son de 0.6 a 1.0, mientras que para la parte inferior las paredes tienen una pendiente de 1.0 a 1.7. Esta forma favorece el mezclado y homogenización de los lodos.

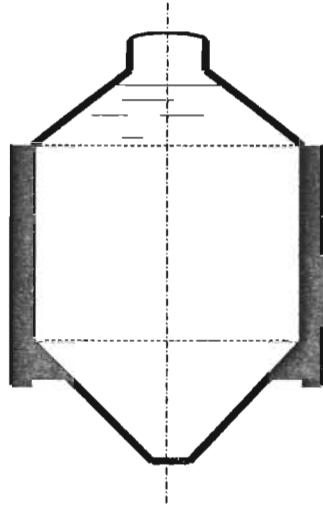


Figura 4.3 Digestor con forma clásica

La **forma americana** (figura 4.4), en la parte superior tiene una cubierta para la captación del biogás y el fondo del digestor tiene una pendiente casi imperceptible. Se ha observado que esta geometría presenta inconvenientes con respecto al mezclado de los lodos, atribuidos principalmente a que su relación diámetro:altura  $> 1$ , lo que provoca zonas muertas, la acumulación de sólidos en el fondo y la generación de natas.

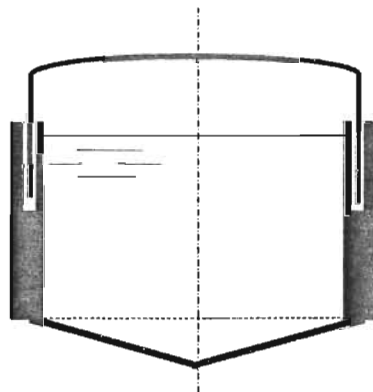


Figura 4.4 Digestor con forma americana

La **forma europea** (figura 4.5), es un cilindro con una relación diámetro:altura  $< 1$ , de poca pendiente en el fondo. Esta geometría se ha visto que tiene eficiencias de mezclado parecidas a la geometría clásica, teniendo la ventaja de que su construcción es más económica, sin embargo, al tener una pendiente baja en el fondo, se limita la elección de los equipos de mezclado.

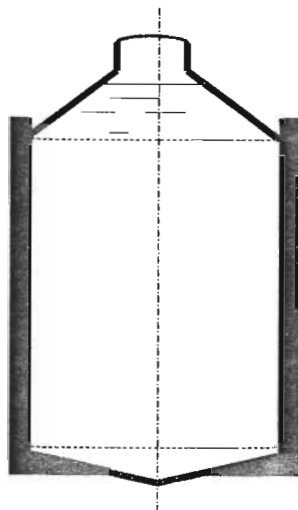


Figura 4.5 Digestor con forma europea

La **forma de huevo (egg-shaped digester: ESD)** mostrada en la figura 4.6, es una evolución de la forma europea y la más avanzada. La geometría de los ESD eliminan la formación de zonas muertas y promueven condiciones óptimas para la circulación y mezclado de lodo, lo cual permite reducir significativamente los requerimientos energéticos para mezclado. La base promueve la concentración del lodo en la parte inferior del mismo, por lo que este es fácilmente mezclado o removido mediante un bombeo. De esta manera, prácticamente no existen problemas con lodos sedimentados y se asegura la utilización completa del volumen del reactor.

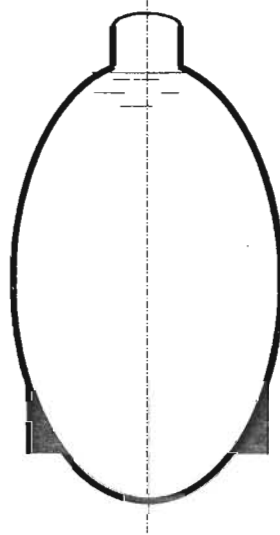


Figura 4.6 Digestor en forma de huevo

#### 4.6 DISEÑO

La mayoría de los métodos utilizados para diseñar un digestor son empíricos, casi todos se basan en el tiempo de retención celular o en la carga orgánica. Debido a que en un reactor completamente mezclado el tiempo de retención celular es igual al tiempo de retención hidráulico ( $\theta = \theta_c$ ), el volumen de un digestor de alta tasa puede ser calculado de la siguiente manera:

$$V = Q\theta_c$$

donde

$Q$  = Gasto ( $m^3/d$ )

$\theta_c$  = Tiempo de retención celular (d)

$V$  = Volumen ( $m^3$ )

Los valores de  $\theta_c$  son recomendados en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4** Tiempos de retención celular mínimos para el diseño de digestores de lodos completamente mezclados (Metcalf y Eddy, 1991)

Temperatura°C	$\theta_c$ para diseño, (d)
18	28
24	20
30	14
35	10
40	10

El límite recomendado para evitar problemas de mezclado y operación se encuentra en 6% de SST en el lodo y esta en función de la carga orgánica a diferentes tiempos de retención y a diferentes temperaturas.

La tabla 4.5 muestra la relación entre la concentración de sólidos en el influente y la carga orgánica a diferentes tiempos de retención.

**Tabla 4.5** Carga recomendada en función de la concentración de sólidos y tiempo de retención hidráulico en digestores anaerobios de lodos (Metcalf & Eddy, 1991)

%SST en el lodo	Carga orgánica (kg SSV/m <sup>3</sup> d)			
	TRH: 10 d (37°C)	TRH: 12 d (35°C)	TRH: 15 d (30°C)	TRH: 20 d (25°C)
4	3.06	2.55	2.04	1.53
5	3.83	3.19	2.55	1.91
6*	4.59	3.83	3.06	2.30
7	5.36	4.46	3.57	2.68
8	6.12	5.10	4.08	3.06
9	6.89	5.74	4.59	3.44
10	7.65	6.38	5.10	3.83

(\*) Límite recomendado para evitar problemas en el mezclado y operación de los equipos de bombeo.  
Nota: Para SSV = 0.75 SST

Dentro de los parámetros más importantes en los procesos anaerobios se encuentran el pH, la acidez, la alcalinidad, la producción de biogás (cantidad y

composición) y para poder obtener una máxima eficiencia del proceso de digestión estos parámetros deben encontrarse dentro de los intervalos óptimos de operación. La tabla 4.6 resume las condiciones ambientales y de operación para obtener la máxima producción de metano durante la digestión anaerobia de lodos de purga.

**Tabla 4.6** Condiciones ambientales óptimas y de operación durante la digestión anaerobia de lodos de purga (Malina y Pohland, 1992)

Variable	Óptimo	Intervalo
PH	6.8-7.4	6.4-7.8
Potencial oxido-reducción (mV)	-520 a -530	-490 a -550
Ácidos volátiles (mg/l de ácido acético)	50-500	<2000
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	1500-3000	1000-5000
Temperatura:		
Mesófila	32-38°C	20-40°C
Termófila	50-56°C	45-60°C
Tiempo de retención hidráulica (d)	10-15	7-30
Composición del gas:		
Metano (CH <sub>4</sub> )(%)	65-70	60-75
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )(%)	30-35	25-40



## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este capítulo describe el experimento que se realizó en la coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para poder llevar a cabo esta parte del proyecto, fue necesaria la construcción de cuatro digestores anaerobios de forma oval, su posterior inoculación y arranque, la cual fue realizada en una etapa anterior.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Como ya se mencionó, se trabajó con cuatro digestores de forma oval (Egg Shaped Digester: ESD), ya que ha sido demostrado que esta geometría tiene ventajas tanto operacionales como de mantenimiento, eliminando la formación de zonas muertas y promoviendo condiciones óptimas para la circulación y mezclado de lodo (figura 5.1).

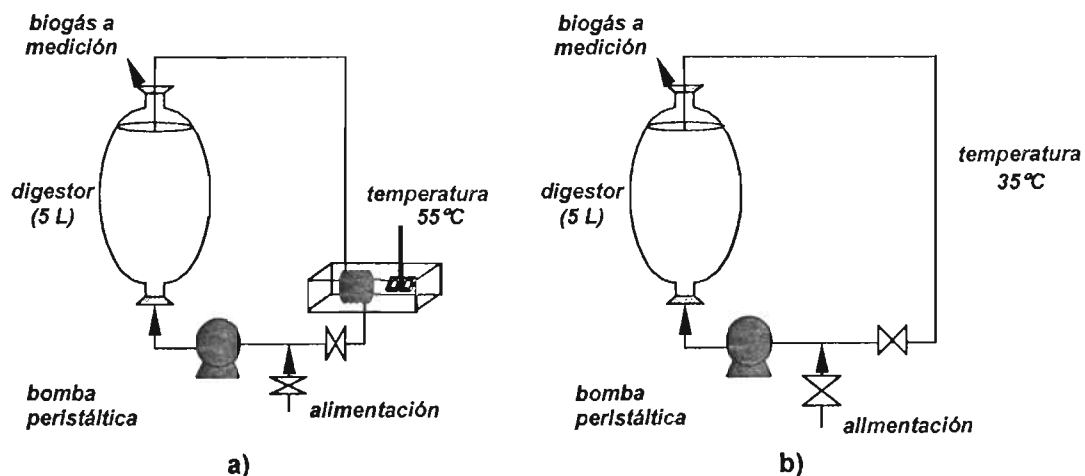
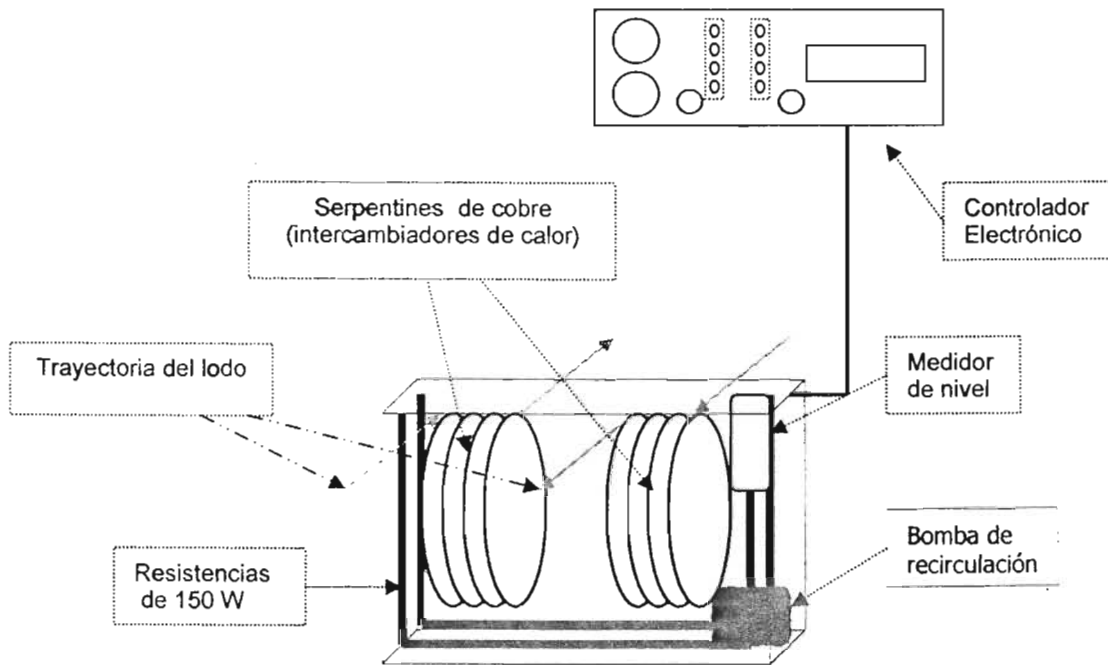


Figura 5.1 a) Modelo del digestor termofílico, b) Modelo del digestor mesofílico.

Los digestores fueron contruidos de cerámica con un vidriado interno cómo revestimiento para facilitar el desplazamiento del lodo por las paredes del digestor. Cada uno tiene una capacidad de 7 L de los cuales 5 L son de volumen útil. En la parte superior cada digestor se encuentra sellado con un tapón de hule el cual tiene dos perforaciones, una de ellas va hacia un dispositivo de medición de biogás que consiste en una probeta invertida llena de agua; su función es la de un sello hidráulico asociado con una medición del volumen de biogás por desplazamiento de agua. En la segunda perforación se encuentra conectada una manguera que sirve para la recirculación del lodo hacia la bomba peristáltica. En la parte inferior se presentan un juego de piezas de PVC conectados a una manguera que recicla el lodo a través de una bomba peristáltica Masterflex.

Los dispositivos experimentales se encuentran dentro de un cuarto a  $35^{\circ}\text{C} \pm 3$ . Los digestores termofilicos cuentan además con un sistema de calentamiento electrónico ajustable a posibles variaciones de temperatura ( $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ), éste dispositivo cuenta con un sistema de alarma para indicar variaciones de temperatura, nivel del líquido (aceite mineral NF 55 de uso comercial) y cambios de voltaje. Además cuenta con dos resistencias de uso comercial de 150 watts cada una y de un recirculador (bomba sumergible estándar de uso comercial).

Este dispositivo se encuentra además integrado por un soporte de aluminio en forma rectangular, dentro del cual descansan dos serpentines de tubo de cobre de  $\frac{1}{2}$  in y 2.3 m de longitud; a lo largo de la estructura y por debajo de los serpientes atraviesan dos resistencias de 150 Watt conectadas en paralelo. El medidor está ubicado de forma tal que el líquido siempre cubra los serpentines. El dispositivo de calefacción es mostrado en la figura 5.2.



**Figura 5.2** Diagrama del intercambiador de calor en los digestores termofílicos.

Para minimizar la pérdida de calor los digestores termofílicos cuentan con un chaleco térmico hecho con papel, algodón y aluminio y las mangueras de recirculación están cubiertas con un tubo térmico de polietileno.

## 5.2 CRITERIOS DE OPERACIÓN

A continuación se describen tanto los parámetros fisicoquímicos como microbiológicos que se siguieron para cada uno de los digestores.

La temperatura es uno de los parámetros más importantes a controlar por la influencia que ejerce dentro del sistema, provocando desplazamientos en las reacciones y a su vez en los valores de varios parámetros, como la composición del biogás.

Los ácidos grasos volátiles (AGV's), son producto de la fermentación y pueden acidificar el reactor provocando el deterioro del proceso. Su alta concentración hace que disminuya la capacidad amortiguadora del reactor. La concentración total de AGV's en condiciones óptimas de operación debe ser inferior a 250 mg/L (Metcalf & Eddy, 1996).

La alcalinidad, expresada como  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ , representa la capacidad amortiguadora del sistema. Los digestores deben tener una alcalinidad entre 1000 y 5000 mg/L para neutralizar los ácidos grasos volátiles y prevenir un cambio de pH (Metcalf & Eddy, 1996).

La relación de alcalinidades ( $\alpha$ ) puede detectar rápida y efectivamente un desequilibrio en el sistema; es recomendable que tenga un valor superior a 0.5, ya que valores inferiores indican una mayor concentración de AGV's y como ya se mencionó, éstos pueden afectar seriamente al proceso.

Otro parámetro de control de suma importancia es la carga orgánica volumétrica ( $B_v$ ), que representa la cantidad de sustrato que ingresa al digestor con respecto al volumen y se expresa de la siguiente manera:

$$B_v = \frac{Q(\text{SSV})}{V}$$

en donde:

$B_v$  = Carga orgánica ( $\text{gSSV}/\text{L}\cdot\text{d}$ )

$Q$  = Gasto o flujo de alimentación ( $\text{L}/\text{d}$ )

(SSV) = Concentración de SSV en alimentación ( $\text{gSSV}/\text{L}$ )

$V$  = Volumen del digestor (L)

Las condiciones de operación a las cuales fueron operados los digestores se muestran en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Condiciones de operación

Digestor	Temperatura (°C)	Alimentación	Cantidad alimentada (mL/día)	Bv <sub>ent</sub> (g SSV/Ld)	TRH
M1	35	LB	350	0.68	14.28
M2	35	LTPA	200	1.27	25.00
T1	55	LB	300	0.62	16.66
T2	55	LTPA	100	0.34	50.00

M1 Digestor mesofílico 1      T1 Digestor termofílico 1      LB Lodo biológico  
M2 Digestor mesofílico 2      T2 Digestor termofílico 2      LTPA Lodo de tratamiento primario avanzado

Se determinó trabajar con lodos de tipo biológico (plantas convencionales) y de tipo fisicoquímico ya que son el producto de las aguas residuales municipales y son las que se generan principalmente en nuestro país. Más detalles sobre este punto se presentan en el apartado 5.4.

### 5.3 ANÁLISIS DE LOS DIGESTORES

Para la evaluación del funcionamiento de los digestores se emplearon métodos incluidos en el Standard Methods (APHA, 1990). En la tabla 3.2 se señalan los parámetros analizados, la técnica empleada y la frecuencia.

**Tabla 5.2** Parámetros analizados para el monitoreo del funcionamiento del digestor

Parámetro	Técnica	Frecuencia
SST (mg/l)	Standard Methods	Tres veces por semana
SSV (mg/l)	Standard Methods	Tres veces por semana
SSF (mg/l)	Standard Methods	Tres veces por semana
pH (unidades de pH)	Potenciómetro	Diario
Temperatura (°C)	Termómetro de mercurio	Constante
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	Standard Methods	Diario
Relación de alcalinidades	(Ripley, 1989)	Diario
Producción	Desplazamiento de agua	Diario
Composición de biogás	Cromatografía de gases	Diario
AGV's	Cromatografía de gases	Tres veces por semana
CF (NMP/gST)	NMP	Al inicio y final

---

#### 5.4 PREPARACIÓN DE LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN

Quincenalmente fueron extraídos en garrafones de plástico lotes de 200 L de lodo. Los lodos de alimentación fueron de dos tipos: Biológicos (LB) traídos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual ubicada en Cerro de la Estrella (PTAR-CE), provenientes de los sedimentadores secundarios; y fisicoquímicos (LTPA) traídos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual ubicada en San Pedro Atocpan (PTAR-SPA).

Los lodos, una vez en el laboratorio, eran preparados de la siguiente manera:

- a) El lodo se homogeneizó para ser cribado en tamices de 4 y 2 mm de tamaño de malla; esto para el lodo fisicoquímico ya que el lodo biológico era cribado en la misma planta.
- b) Una vez tamizado, el lodo se dejaba sedimentar por alrededor de cinco horas, después de pasado este tiempo era retirado el sobrenadante. El lodo era recuperado en recipientes más pequeños (aproximadamente de 25 L), posteriormente fueron almacenados en un cuarto frío (4°C). Esta operación se realizó para todo el lote.
- c) Para la alimentación diaria de los digestores se extraía de los garrafones de 25 L la cantidad necesaria de lodo. El lodo fue aclimatado a temperatura de 35 °C antes de ser introducido a los digestores para evitar cambios drásticos de temperatura en la biomasa.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los gráficos mostrados en este apartado, muestran algunos de los resultados obtenidos en el laboratorio de la Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Las tablas con los resultados correspondientes a dichas pruebas se incluyen en el Anexo II.

Debido a fallas en el cromatógrafo no fue posible determinar con más frecuencia la cantidad de ácidos grasos por lo que sólo se tomó un promedio de 7 datos tanto para los lodos de alimentación como de los cuatro digestores.

### 6.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE ALIMENTACIÓN

Para poder presentar los resultados de los digestores, es necesario conocer con anterioridad las características de los lodos con que fueron alimentados; para ello se mostrarán los parámetros que fueron determinados tanto para el lodo biológico como para el lodo de tratamiento primario avanzado.

#### 6.1.1 LODO BIOLÓGICO

Se puede observar en la tabla 6.1 que el lodo presenta un pH de 6.76, con una desviación estándar de 0.25; presenta una alcalinidad entre 404 y 665 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ . La fracción volátil del lodo biológico es de 69% en promedio. Con respecto a los coliformes fecales se obtuvo un promedio de  $1.50 \text{ E}+5$  de un total de 14 muestras.

**Tabla 6.1** Datos promedio obtenidos en el lodo biológico de alimentación de los digestores M1 y T1

	pH	Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Alfa	SST (gSST/L)	SSV (gSSV/L)	SSF (gSSF/L)	% SSV	CF (MNP/gST)
No. de datos	92	92	92	47	47	47	47	14
Promedio	6.76	535	0.49	14	10	4	69.41	1.50 E+05
Desviación estándar	0.25	131	0.09	2	1	1	3.91	1.97 E+05

En cuanto a ácidos grasos (AGV's) se refiere solo se registraron concentraciones de ácido acético, encontrando un valor promedio de 62 mg/L de un total de 7 muestras.

### 6.1.2 LODO DE TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO

Se puede observar en la tabla 6.2 que el lodo presenta un pH de 5.46, con una desviación estándar de  $\pm 0.5$ , presentando una alcalinidad entre 1336 y 680. La relación de alcalinidades (alfa) es muy baja ya que hay que tomar en cuenta que en la mayoría de los casos no fue posible determinarla, dado que el lodo de tratamiento primario avanzado presentó condiciones ácidas. La fracción volátil promedio del lodo es de 68.93%. En cuanto a los coliformes fecales se obtuvo un promedio de 2.45 E+4 de un total de 14 muestras.

**Tabla 6.2** Datos promedio obtenidos en el lodo fisicoquímico de alimentación de los digestores M2 y T2

	pH	Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	SST (gSST/L)	SSV (gSSV/L)	SSF (gSSF/L)	% SSV	CF (MNP/gST)
No. de datos	92	91	47	47	47	47	14
Promedio	5.46	1008	49	34	15	69	2.45 E+4
Desviación estándar	0.5	328	8	6	2	3	5.26 E+4

En cuanto a los ácidos grasos se registraron concentraciones de acético, propiónico y butírico muy superiores a los de los lodos biológicos, entre 1767, 1206 y 198 mg/L respectivamente (valores promedio) de un total de 7 muestras.



## 6.2 PARÁMETROS DE CONTROL DE LOS DIGESTORES MESOFÍLICOS

En este inciso se hará el seguimiento del pH, alcalinidad, alfa y carga orgánica de los bioreactores mesofílicos. Se muestran los resultados de un período de 123 días de la corrida experimental.

### 6.2.1 DIGESTOR M1

En este reactor se encontró que el pH promedio fue de 7.41 con una variación entre 7.08 a 7.74. La alcalinidad presentó grandes fluctuaciones alrededor de 1676 mgCaCO<sub>3</sub>/L con una desviación estándar de  $\pm 474$  mgCaCO<sub>3</sub>/L, observándose una tendencia descendente (figura 6.1). Los parámetros anteriores estuvieron dentro de los intervalos óptimos descritos por Malina y Pohland (1992), entre 6.8-7.4 para el pH y entre 1500-3000 mgCaCO<sub>3</sub>/L para la alcalinidad.

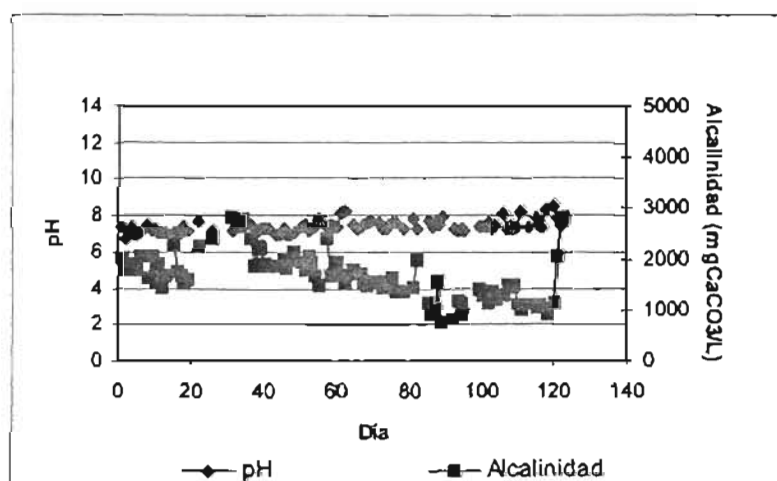


Figura 6.1 Evolución del pH y alcalinidad en el digestor M1

La relación de alcalinidades tuvo un promedio de 0.75 con un intervalo de 0.66 - 0.84 (figura 6.2). Estos resultados indicaron que el reactor tuvo la capacidad de asimilar el sustrato que se alimento ya que solo en dos ocasiones se presentaron problemas de acidificación que no causaron problemas en la operación, ya que la recuperación fue prácticamente inmediata.

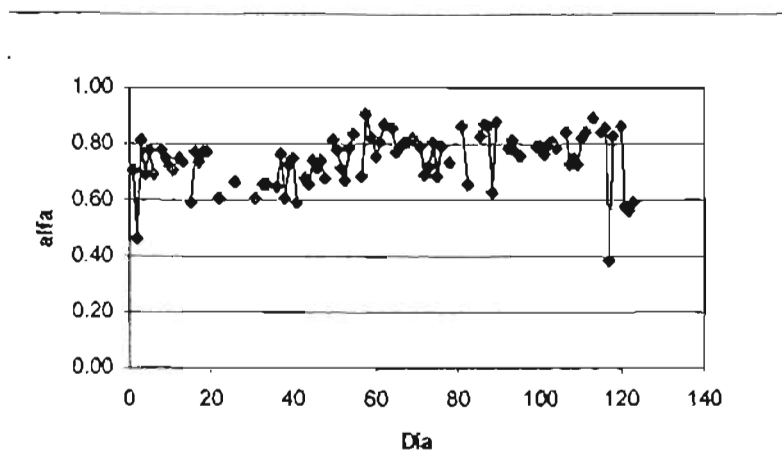


Figura 6.2 Evolución de la relación de alcalinidades en M1

En cuanto a los ácidos grasos volátiles se refiere no se detectaron concentraciones a la salida.

Se trató de mantener una carga orgánica entre 0.6 y 0.7 mgSSV/Ld, siendo el valor promedio de 0.68 gSSV/Ld, con variaciones en un intervalo entre 0.58 y 0.78 gSSV/Ld (figura 6.3). Esto también causó variaciones en la salida del digester. El intervalo encontrado para la carga orgánica de salida fue de 0.01-0.48 gSSV/Ld el valor promedio fue de 0.29 gSSV/Ld.

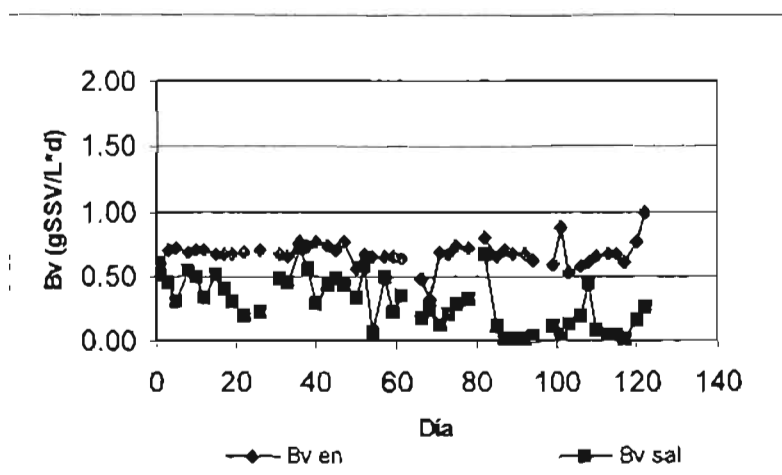


Figura 6.3 Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en M1

## 6.2.2 DIGESTOR M2

El valor promedio encontrado de pH fue de 7.18 con una desviación estándar de  $\pm 0.26$ . La alcalinidad se mantuvo alrededor de 3643 mgCaCO<sub>3</sub>/L con una desviación estándar de  $\pm 531$  mgCaCO<sub>3</sub>/L (figura 6.4). Este valor de alcalinidad se encontró dentro del intervalo para un buen funcionamiento en procesos anaerobios entre 1000 y 5000 mgCaCO<sub>3</sub>/L (Metcalf y Eddy, 1996).

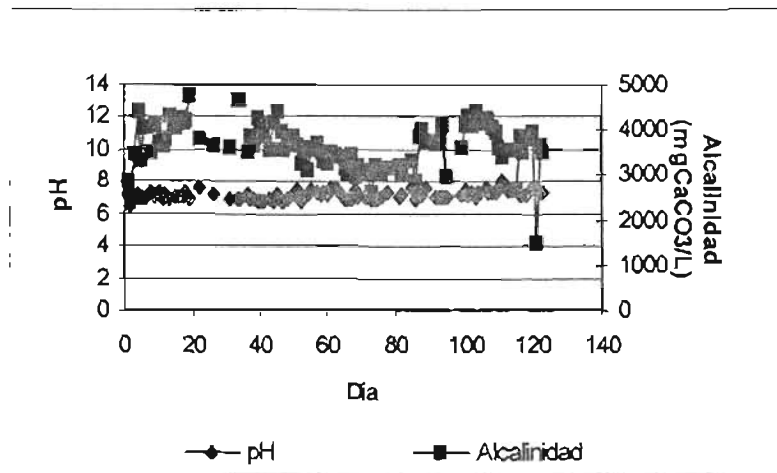


Figura 6.4 Evolución del pH y alcalinidad en el digestor M2

El valor promedio de alfa se ubicó en 0.35 dentro de un intervalo de 0.29 a 0.41 (figura 6.5). Estos valores son bajos e indican una inestabilidad en el proceso. La concentración de AGV's en el digestor fue muy alta, como se verá a continuación, con lo que se corrobora el dato de la relación alfa.

Las cargas orgánicas de entrada en este digestor variaron de 0.95 hasta 1.59 gSSV/Ld, el valor promedio fue de 1.27 gSSV/Lg (figura 6.6). Las cantidades promedio de ácidos grasos encontrados en este reactor fueron 868, 4457 y 217 mg/L para el ácido acético, propiónico y butírico respectivamente, valores sumamente elevados en relación con el nivel de AGV's recomendado, inferior a 1000 mg/L.

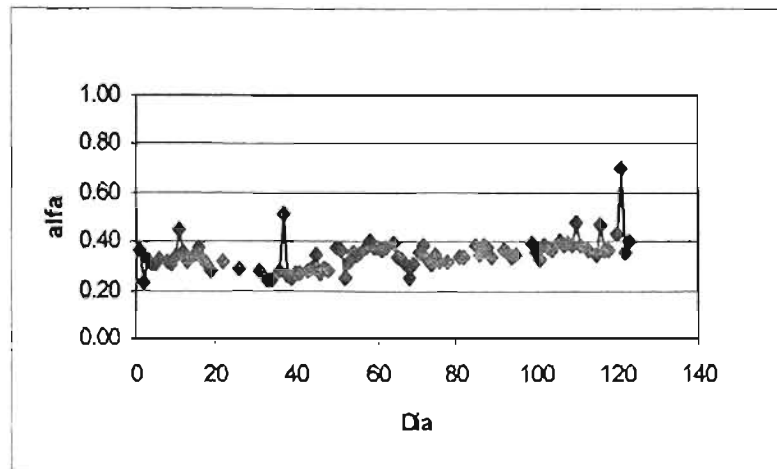


Figura 6.5 Evolución de la relación de alcalinidades en M2

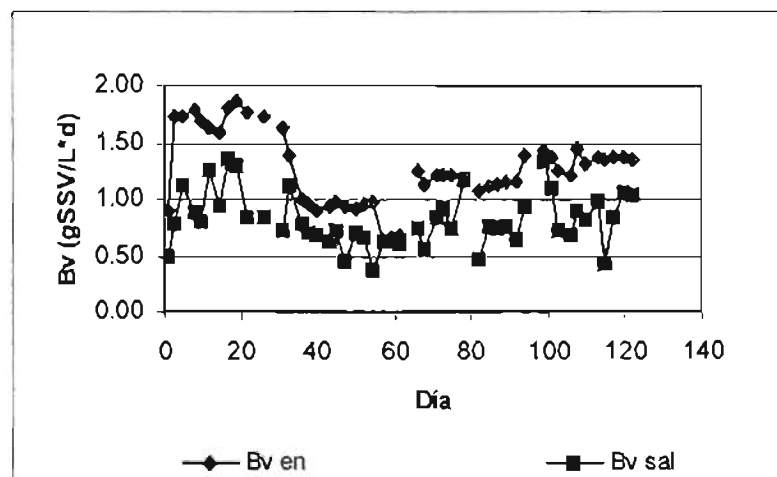


Figura 6.6 Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en M2

### 6.3 PARÁMETROS DE CONTROL DE LOS DIGESTORES TERMOFÍLICOS

Se hará el seguimiento del pH, alcalinidad, alfa y carga orgánica de los digestores termofílicos, tomándose un período de 123 días de operación (4 meses).

#### 6.3.1 DIGESTOR T1

El pH promedio es de este digestor fue de 7.61 con un intervalo entre 7.32 y 7.90. La alcalinidad presentó grandes fluctuaciones entre 1773 y 2287 mgCaCO<sub>3</sub>/L, con un promedio de 2030 mgCaCO<sub>3</sub>/L. Se observó una tendencia decreciente en la alcalinidad (figura 6.7). Los valores anteriores se encuentran dentro de los intervalos óptimos de operación según Malina y Pohland (1992), que van para el pH de 6.8-7.4 y para la alcalinidad de 1500-3000 mgCaCO<sub>3</sub>/L.

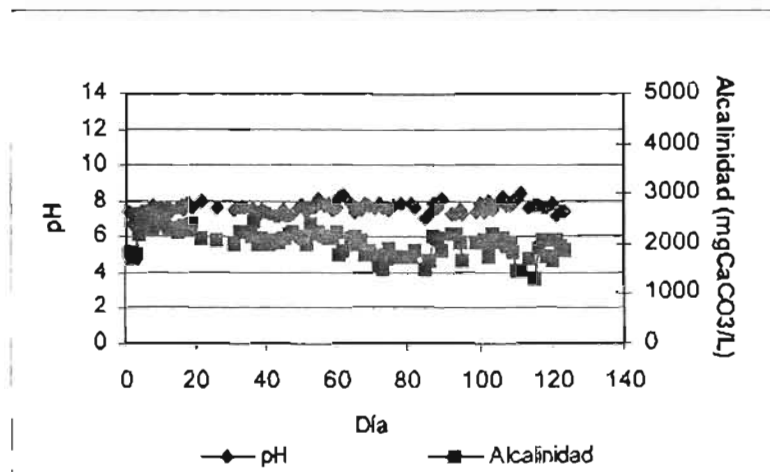


Figura 6.7 Evolución del pH y alcalinidad en el digestor T1

La relación de alcalinidades fue de 0.73 con un intervalo entre 0.66 y 0.80 (figura 6.8). Al igual que el caso del digestor M1 esto indicó que el digestor estaba en posibilidad de consumir más sustrato, ya que tuvo una buena capacidad amortiguadora.

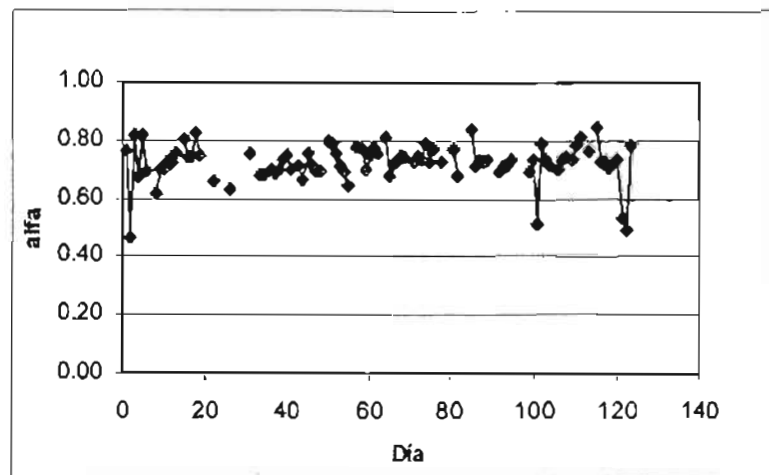


Figura 6.8 Evolución de la relación de alcalinidades en T1

La carga orgánica de entrada de este digestor se mantuvo alrededor de 0.62 gSSV/Ld (valor promedio), aunque hay variaciones en un intervalo entre 0.53 y 0.71 gSSV/Ld (figura 6.9). El promedio para la carga orgánica de salida fue de 0.32 gSSV/Ld con una variación de  $\pm 0.15$  gSSV/Ld.

Los valores de salida de ácidos grasos volátiles fueron de 51 mg/L para el ácido acético; para el propiónico y butírico no se detectaron concentraciones.

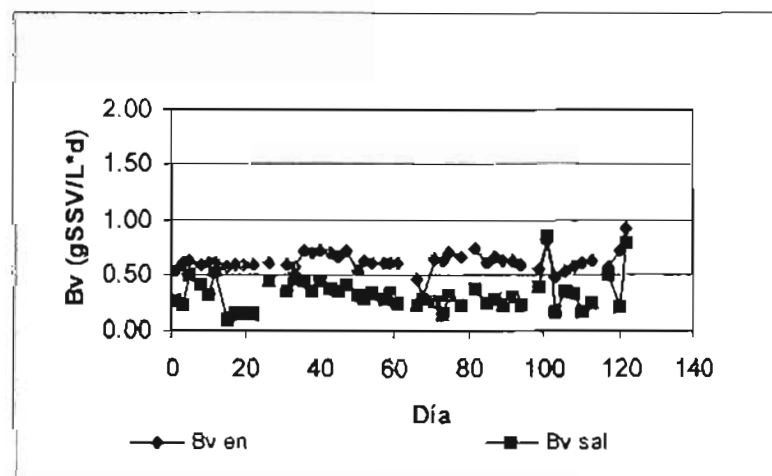


Figura 6.9 Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en T1

### 6.3.2 DIGESTOR T2

El valor promedio de pH fue de 7.63 con un intervalo entre 7.34 y 7.92. La alcalinidad promedio fue de 3007 mgCaCO<sub>3</sub>/L con una desviación estándar de  $\pm 801$  mgCaCO<sub>3</sub>/L (figura 6.10), se encuentra dentro del intervalo óptimo para un buen funcionamiento en procesos anaerobios descrito por Noyola (1998), entre 1000 y 5000 mgCaCO<sub>3</sub>/L.

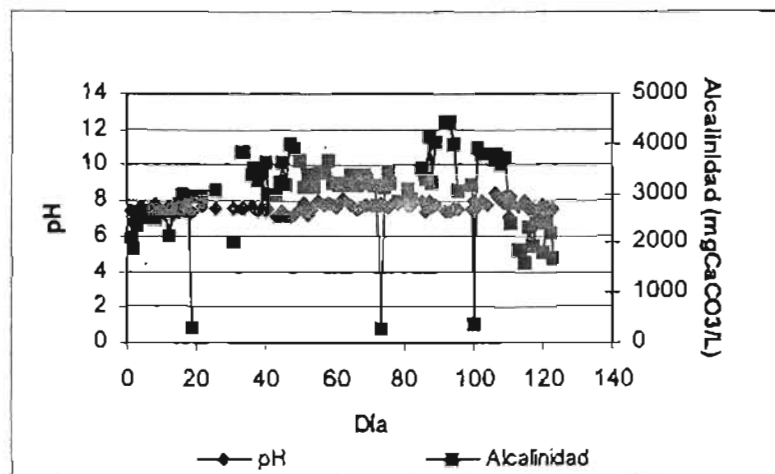


Figura 6.10 Evolución del pH y alcalinidad en el digestor T2

El valor promedio de alfa fue de 0.44 dentro de un intervalo entre 0.34 y 0.54 (figura 6.11), estos valores son bajos los cuales indican que el proceso tuvo una tendencia a acidificarse.

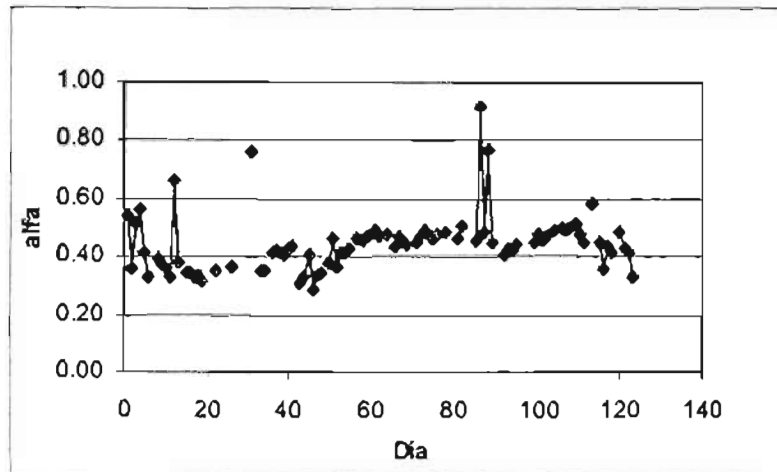


Figura 6.11 Evolución de la relación de alcalinidades en T2

La carga orgánica de entrada en este digester tuvo fluctuaciones entre 0.26 y 0.42 gSSV/Ld con un valor promedio de 0.34 gSSV/Ld, mientras que en la carga orgánica de salida el promedio fue de 0.28 gSSV/Ld con una desviación estándar de  $\pm 0.12$  gSSV/Ld (figura 6.12). A pesar del gran tiempo de retención (50 días) este digester presentó una elevada concentración de ácidos grasos volátiles. En la salida este reactor tuvo 1215, 1517 y 137 mg/L para el ácido acético, propiónico y butírico, respectivamente. Estos valores son altos para una operación adecuada.

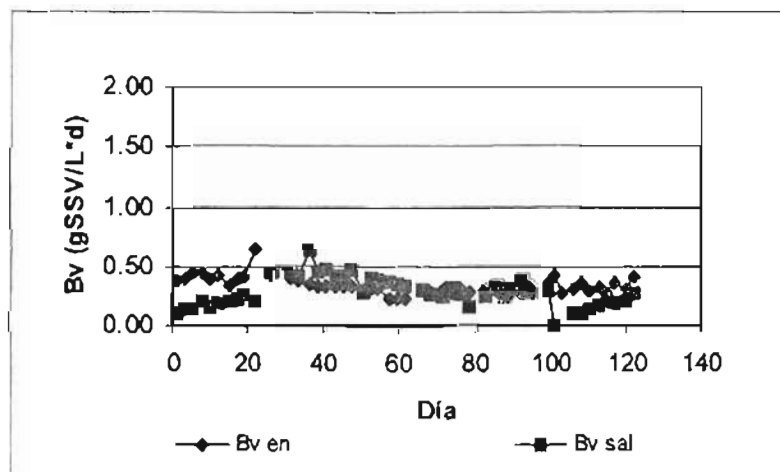


Figura 6.12 Evolución de la carga orgánica de entrada y salida en T2



## 6.4 PARÁMETROS DE RESPUESTA DE LOS DIGESTORES MESOFÍLICOS

En este inciso se hará el seguimiento de la carga orgánica eliminada, % de metano producido en función del tiempo y la carga orgánica, y del porcentaje de remoción de sólidos volátiles (%RSV), habiéndose tomado el resultado de 123 días de operación (4 meses). Además, se determinó la eliminación de microorganismos parásitos en un período de 14 días al final del experimento.

### 6.4.1 DIGESTOR M1

En el seguimiento de este reactor se encontró que la producción de biogás fue muy variable, con valores entre 431 y 850 mL/d (figura 6.13). La composición de metano en promedio fue del 68 % con una desviación estándar de 12 %.

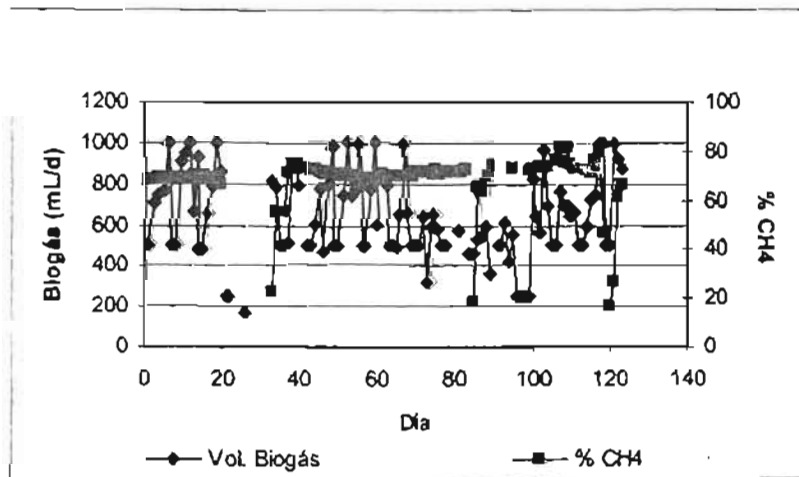
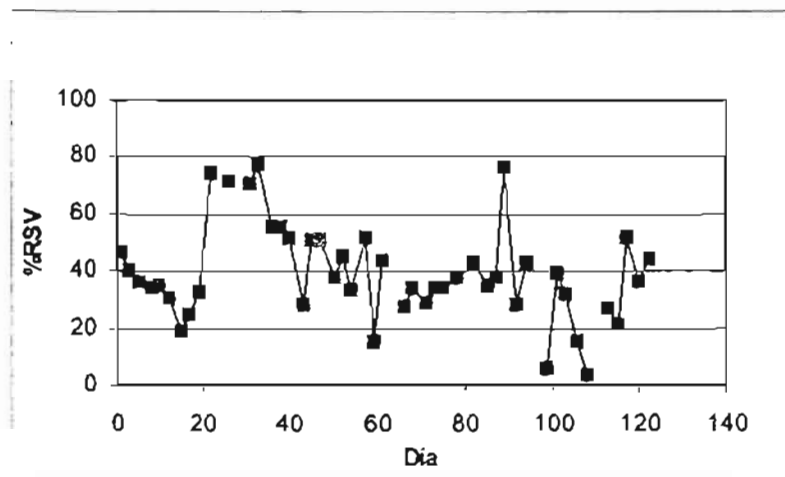


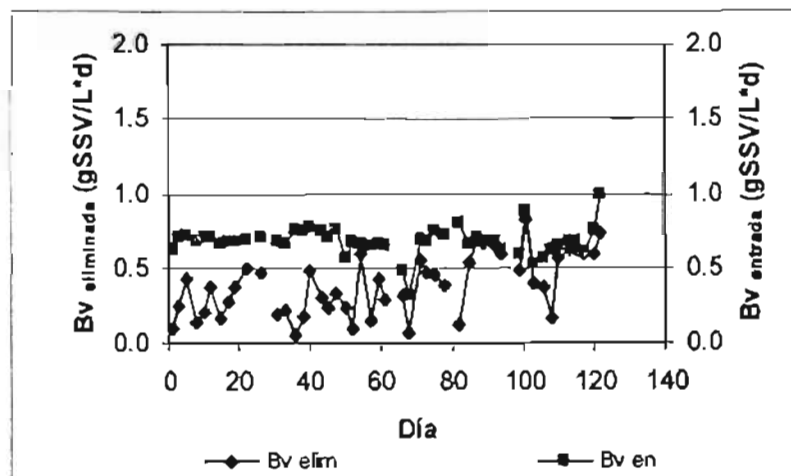
Figura 6.13 Composición y producción de biogás en el digestor M1

El porcentaje de reducción de sólidos volátiles (%RSV) promedio fue de 39 % obteniendo una desviación estándar de  $\pm 17\%$  (figura 6.14); esto indica deficiencias dentro del proceso, que podrían ser tanto a nivel microbiológico como operativo. Se observó que dichos porcentajes fueron bajos comparados con los presentados en la tesis de Castro (2001), la cual obtiene %RSV del 84 en promedio.



**Figura 6.14** Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles con respecto al tiempo en el digester M1

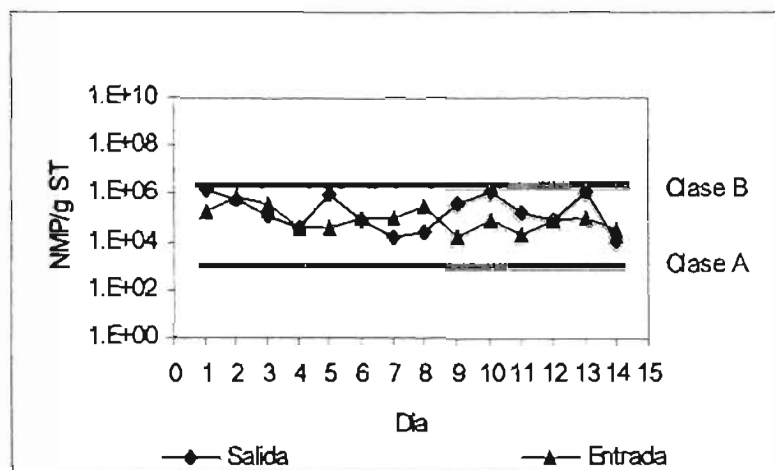
La carga orgánica eliminada de este digester se mantuvo alrededor de 0.39 gSSV/Ld, sin embargo se determinaron grandes variaciones a lo largo de un intervalo que va de 0.19 a 0.59 gSSV/Ld (figura 6.15). Indudablemente en los últimos días comenzó una mejora en el reactor y un mejor desarrollo de la digestión anaerobia.



**Figura 6.15** Evolución de la carga orgánica de eliminada en el digester M1

Tanto el lodo de entrada como el de purga se encuentran dentro de la clase B, lo cual era de esperarse ya que los lodos mesofílicos no pueden llegar a la clase A

debido a la temperatura con la cual trabajan. En la figura 6.16 se puede observar que no hubo una remoción de coliformes fecales e incluso existió en ocasiones una mayor cantidad de estos organismos dentro del digestor (figura 6.16). Este último resultado puede deberse a las variaciones de la técnica aplicada.



**Figura 6.16** Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor M1.

#### 6.4.2 DIGESTOR M2

La producción de biogás de este reactor tuvo un valor promedio de 239 mL/d, se observó una desviación estándar de  $\pm 224$ ; el porcentaje de metano no es tan variable teniendo un valor promedio de 60% con una desviación estándar de  $\pm 10\%$  (figura 6.17). El porcentaje de metano se encuentra cerca del intervalo establecido como óptimo para una operación estable que van de 65 a 70 % (Malina y Pohland, 1992). Esto puede indicar dos cosas, la inestabilidad en el proceso de la digestión anaerobia o bien problemas a nivel mecánico; como el porcentaje de metano se encuentra cerca del intervalo óptimo para una operación estable se puede descartar la inestabilidad en el proceso de digestión anaerobia por lo que el problema que se tuvo es un problema mecánico (agitación o mezclado).

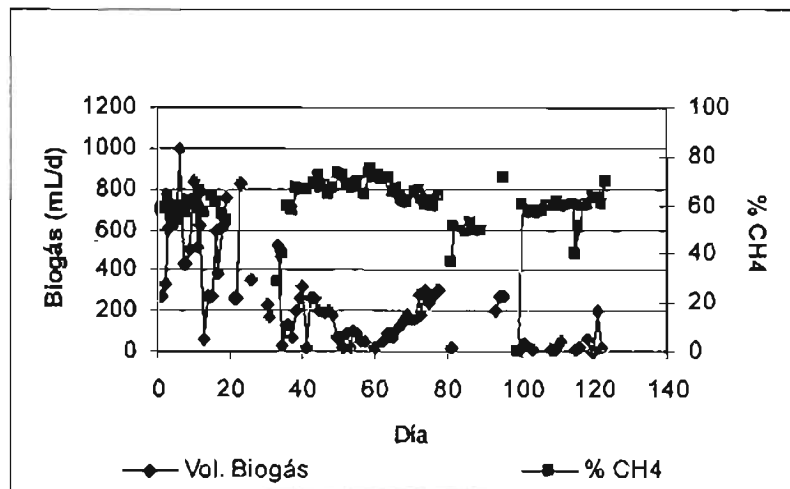


Figura 6.17 Composición y producción de biogás en el digestor M2

El porcentaje de remoción de los sólidos volátiles tuvo un valor promedio de 23% encontrándose una desviación estándar de  $\pm 14\%$  (figura 6.18), en los últimos treinta días, presentó mayores porcentajes de reducción de sólidos volátiles, lo que está indicando una recuperación del proceso. Aunque no se descartan problemas de índole mecánico, específicamente deficiencias en el mezclado o agitación, el porcentaje de remoción de sólido volátil (%RSV) encontrado está por debajo del mínimo señalado para un proceso anaerobio, es decir 40% (WEF, 1993).

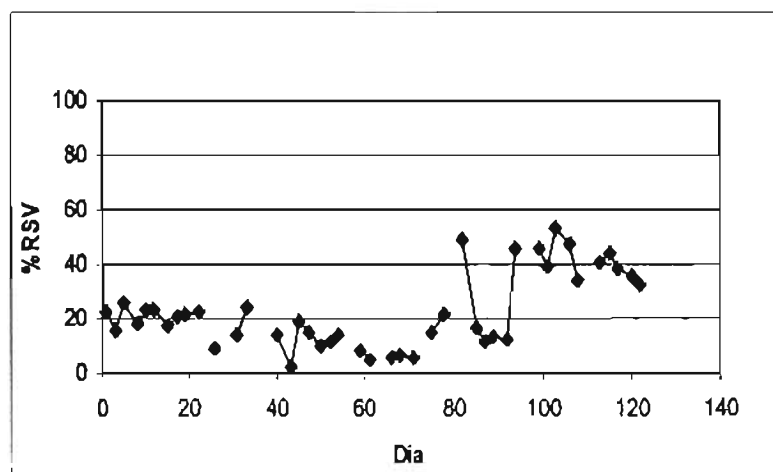


Figura 6.18 Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles con respecto al tiempo en el digestor M2

La carga promedio alimentada en este digestor se encuentra entre 1.27 gSSV/Ld con una desviación estándar de  $\pm 0.32$ .

La carga orgánica eliminada promedio fue de 0.45 gSSV/Ld, con una desviación estándar de  $\pm 0.25$ . Este rango es amplio (figura 6.19), lo que es un reflejo de que en ningún momento se observó una estabilidad en este parámetro; sin embargo, a partir del día 66 se comenzó a ver una ligera tendencia a la estabilización.

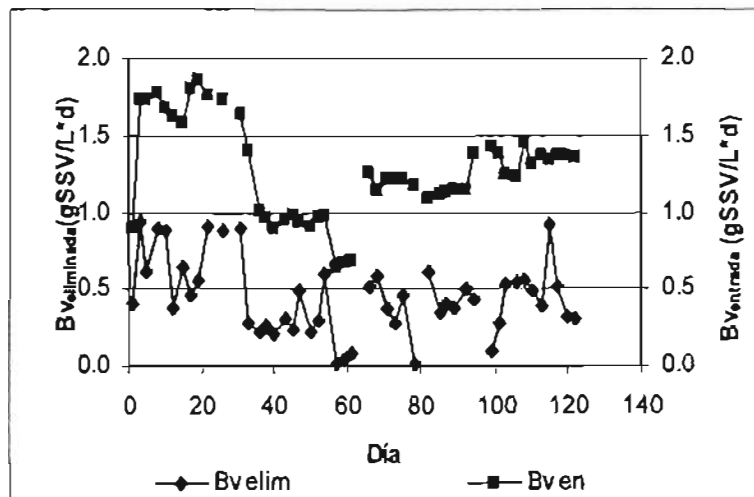


Figura 6.19 Evolución de la carga orgánica de eliminada en el digestor M2

En M2, el lodo de entrada y el lodo de purga se encuentran dentro de la clase B en cuanto a coniformes fecales. Se puede observar que no hay una remoción de coliformes fecales e incluso en ocasiones existe una mayor cantidad de estos organismos dentro del digestor a diferencia del lodo de entrada (figura 6.20). Aparentemente puede estar favoreciéndose el proceso de desarrollo de estos microorganismos, aunque no deben descartarse problemas en la técnica analítica.

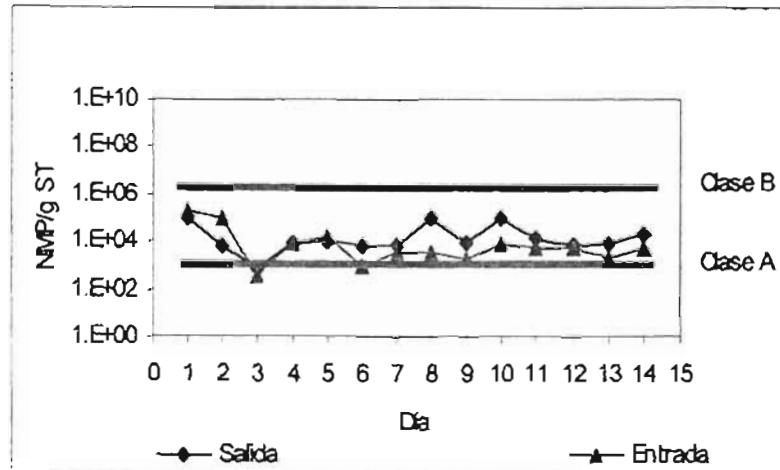


Figura 6.20 Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor M2.

## 6.5 PARÁMETROS DE RESPUESTA DE LOS DIGESTORES TERMOFÍLICOS

Como ya se mencionó en el inciso anterior, se hizo el seguimiento de algunos de los parámetros que proporcionen información para la evaluación del funcionamiento del digestor. En este inciso se presenta la carga orgánica eliminada, % de metano producido en función del tiempo y la carga orgánica, y %RSV, habiéndose tomado el resultado de 123 días de operación (4 meses). También para estos digestores se determinó la eliminación de microorganismos parásitos, los resultados fueron obtenidos durante 14 días al final del experimento.

### 6.5.1 DIGESTOR T1

En el seguimiento de este reactor se encontró que la producción de biogás fue muy variable por lo que no fue confiable; el promedio fue de 647 mL/d con una desviación estándar de  $\pm 270$  (figura 6.21). Los valores de la composición de metano se encontraron alrededor del 71% con una desviación estándar de  $\pm 5\%$ . Los valores del porcentaje de metano producido se encuentran dentro del intervalo óptimo que va del 65 al 70% de metano e incluso en ocasiones son superiores.

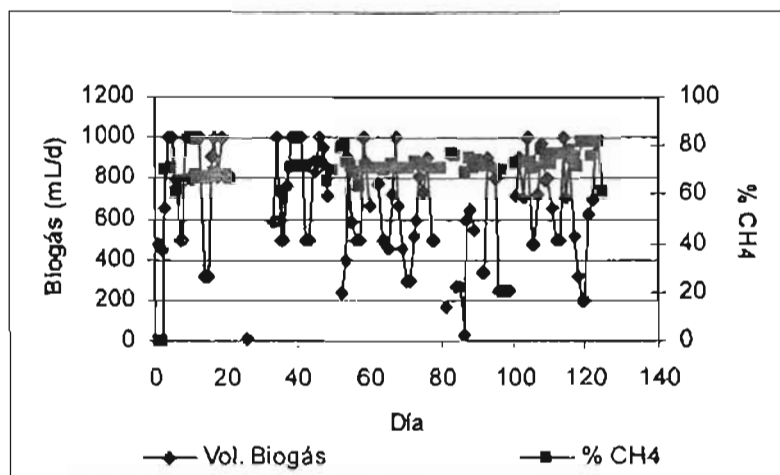


Figura 6.21 Composición y producción de biogás en el digestor T1

A lo largo del experimento se observaron porcentajes de remoción de sólidos volátiles (%RSV) relativamente bajos, con un porcentaje promedio de remoción de 45 % y con una desviación estándar de  $\pm 18\%$ ; en los últimos días se empieza a notar una mejoría en el reactor (figura 6.22). El porcentaje de remoción de sólido volátil señalado como mínimo para un proceso anaerobio es de 40 % (WEF, 1993). La carga orgánica alimentada fue en promedio de 0.62 gSSV/Ld con una desviación estándar de  $\pm 0.09$ .

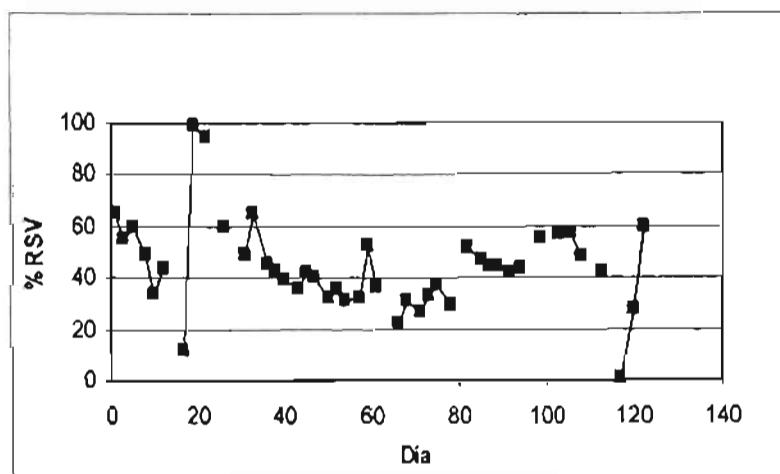


Figura 6.22 Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles con respecto al tiempo en el digestor T1

La carga orgánica eliminada de este digestor se mantuvo alrededor de 0.30 gSSV/Ld, sin embargo se presentaron variaciones a lo largo de un intervalo que va de 0.18 a 0.42 gSSV/Ld (figura 6.23). Indudablemente debe haber cierta acumulación de lodo dentro del reactor, un mal desarrollo de la digestión anaerobia o un problema mecánico ya que los parámetros de control antes mencionados se encuentran dentro de los intervalos óptimos de operación para un reactor estable, pero como se ha podido observar, la reducción de sólidos volátiles y la carga eliminada no fueron buenas por lo que se descarta un mal funcionamiento de la digestión anaerobia y se deduce que el problema es de tipo mecánico.

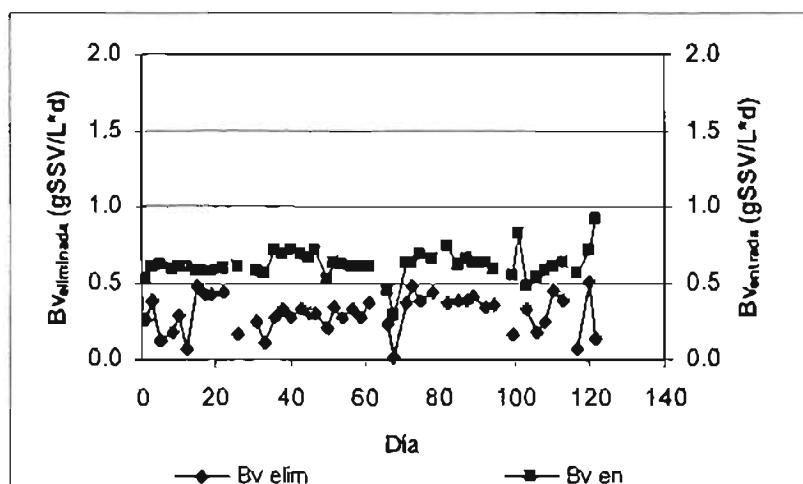


Figura 6.23 Evolución de la carga orgánica de eliminada en el digestor T1

Se puede observar una clara eliminación de coliformes fecales dentro del reactor, en promedio se eliminó  $9.29 \times 10^3$  NMP/g ST. Tanto el lodo de entrada como el de purga se encuentran dentro de la clase B, aunque en el lodo de purga hay claras tendencias hacia la clase A, y esto es debido a que la temperatura favorece la destrucción o remoción de estos microorganismos. A pesar de existe una eliminación favorable de coliformes fecales no son del todo el resultado esperado ya que se pretende que estos lodos se ubiquen dentro de la clase A ( $1 \times 10^3$ ) y la temperatura manejada en este reactor ayuda a la destrucción de dichos parásitos (figura 6.24).



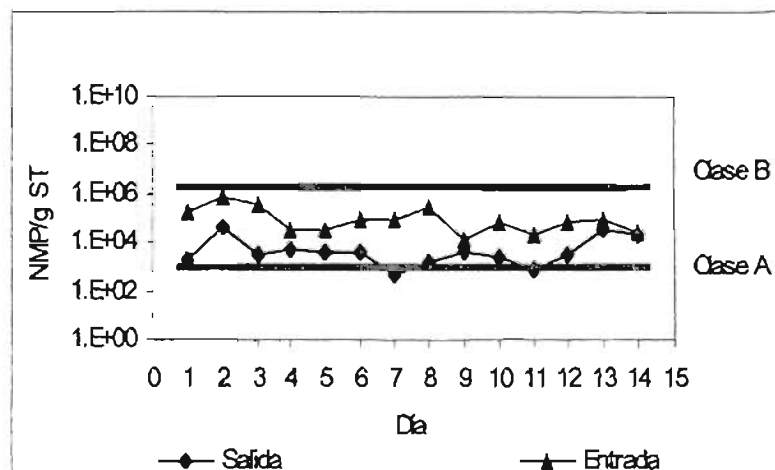


Figura 6.24 Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor T1.

### 6.5.2 DIGESTOR T2

La producción de biogás es muy variable encontrándose un valor promedio de 287 mL/d con una desviación estándar de  $\pm 229$  mL/d (figura 6.25). Los valores de la composición de metano se encontraron alrededor del 65 % con una desviación estándar de  $\pm 16$  %. Los primeros valores del porcentaje de metano producido se encuentran por debajo del intervalo óptimo que va del 65 al 70% y esto es debido a que se alimentaba un volumen de 325mL; después se redujo a 300 mL para mejorar la eficiencia del reactor.

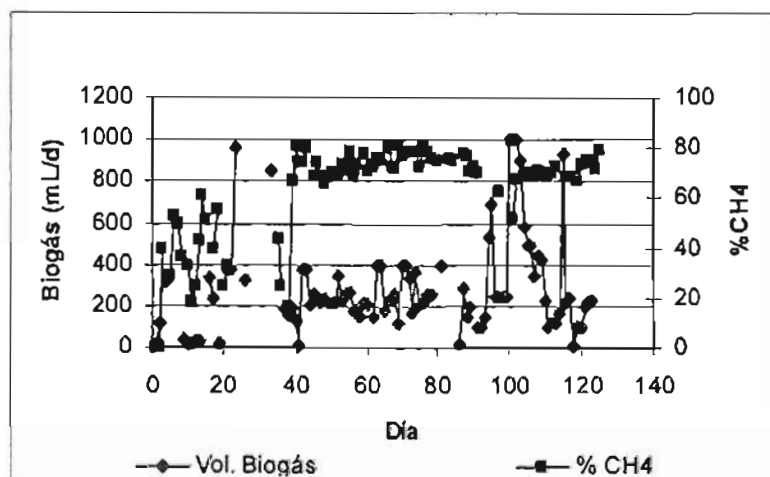


Figura 6.25 Composición y producción de biogás en el digestor T2

Se tienen porcentajes de reducción de sólidos volátiles bastante bajos, el promedio fue de 24 % encontrando una desviación estándar de  $\pm 18\%$  (figura 6.26), valores que se encuentran muy por debajo del mínimo señalado para un proceso anaerobio que es de 40 % (WEF, 1993). Al final, se puede identificar una clara mejoría en este parámetro.

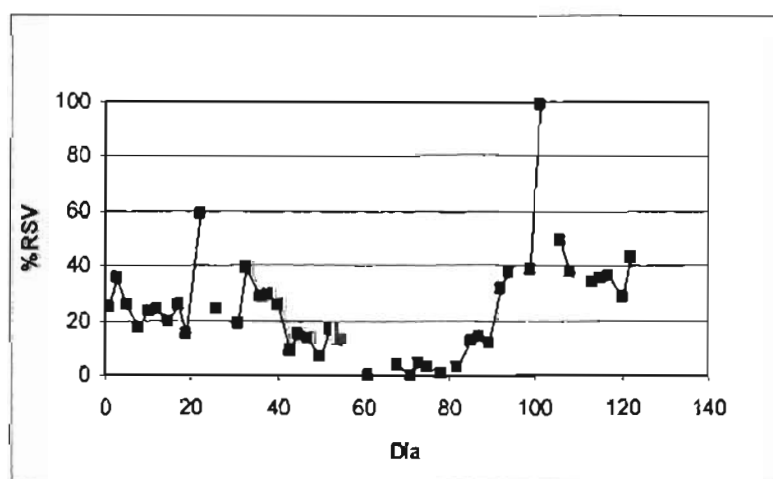


Figura 6.26 Evolución del porcentaje de reducción de sólidos volátiles con respecto al tiempo en el digestor T2

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

La carga orgánica de entrada promedio que se trabajó en el digestor fue de 0.34 gSSV/Ld con una desviación de  $\pm 0.08$  gSSV/Ld.

La carga orgánica eliminada fue de 0.18 gSSV/Ld con una desviación estándar de  $\pm 0.12$  (figura 6.27). En varias muestras no hubo eliminación, se presentó una perdida de lodo debido a un taponamiento en las mangueras (probablemente el digestor no contó con un buen mezclado). Para obtener una pronta recuperación del reactor se decidió alimentarlo con una mezcla de lodo biológico y lodo estabilizado del digestor T1.

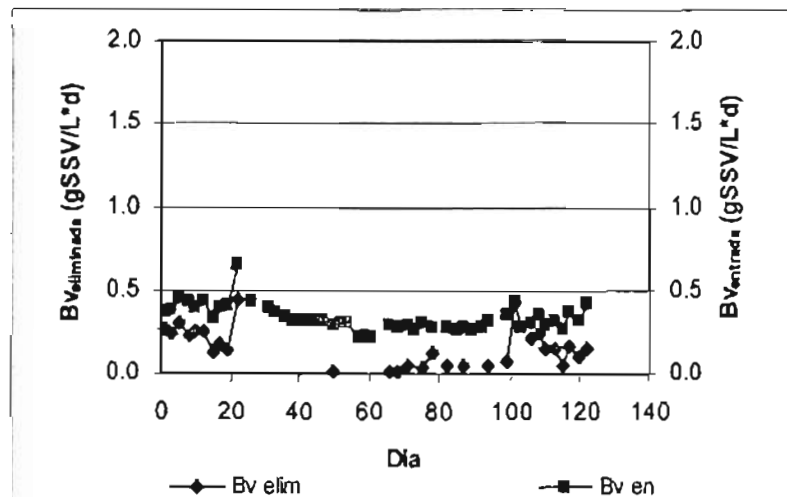


Figura 6.27 Evolución de la carga orgánica de eliminada en el digestor T2

Tanto el lodo de entrada como el de purga se encontraron dentro de la clase B. Se puede observar que no hay o no es muy clara la remoción de coliformes fecales e incluso en algunos puntos existe una mayor cantidad de estos organismos en la salida a diferencia del lodo de entrada (figura 6.28). Puede ser que los microorganismos no cumplieron con el tiempo de retención destinado ya que como se ha venido mencionando aparentemente la recirculación del lodo no es suficiente para un buen mezclado del sistema por lo tanto no existe una homogeneidad.

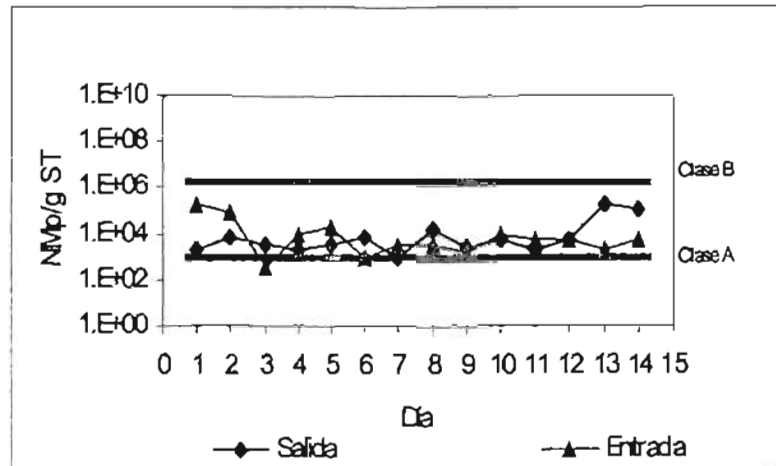


Figura 6.28 Eliminación de coliformes fecales durante 14 días en el digestor T2.

## 6.6 RESULTADOS DE OPERACIÓN REPRESENTATIVOS

En la tabla 6.3 se presenta un resumen de los datos promedio de cada uno de los digestores durante el periodo de experimentación.

Tabla 6.3 Condiciones promedio de operación de los digestores.

Parámetro	M1	M2	T1	T2
TRH	14.28	25	16	50
pH	7.41	7.18	7.61	7.63
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	1676	3644	2031	3007
Relación de alcalinidades ( $\alpha$ )	0.75	0.35	0.73	0.44
T (°C)	35	35	55	55
Alimentación (mL/d)	350	188	318	100
Biogás (mL/d)	641	239	648	288
CH <sub>4</sub> (%)	68	61	71	65
Entrada (g SSV/L)	9.71	31.75	9.92	17
Entrada (g SSV/d)	3.4	6.0	3.1	1.7
Entrada SSV/SST (%)	69.41	68.93	69.41	68.93
Salida (g SSV/L)	4.14	20.50	5.12	14
Salida (g SSV/d)	1.45	3.85	1.6	1.4
Salida g SSV/SST (%)	56.75	63.40	55.51	61.90
E reactor (%)	57	36	48	18
RSV (%)	39.44	22.66	44.46	24.14
Bv entrada (g SSV/L*d)	0.68	1.27	0.62	0.34
Bv salida (g SSV/L*d)	0.29	0.82	0.32	0.28
Bv eliminada (g SSV/L*d)	0.39	0.45	0.3	0.16
mL CH <sub>4</sub> /d	435	145	463	187
mL CH <sub>4</sub> TPN /d	297	99	315	127
mL CH <sub>4</sub> TPN /g SSV alimentado	87.35	16.5	101.6	74.7
mL CH <sub>4</sub> TPN /g SSV eliminado	152.3	46.9	205.9	158.7

% RSV = porcentaje de reducción de la fracción de sólidos volátiles según el cálculo de Metcal & Eddy (1991)

$$\%E \text{ reactor} = \text{Eficiencia de remoción de SSV} = \frac{(gSSV)_{\text{influyente}} - (gSSV)_{\text{efluente}}}{(gSSV)_{\text{influyente}}}$$

## 6.7 BIODIGESTORES MESÓFILOS Y TERMÓFILOS

Al realizar la comparación del funcionamiento de los digestores a lo largo de este periodo experimental se puede llegar a las siguientes observaciones:

Los cuatro digestores siempre mostraron una buena capacidad amortiguadora, manteniendo un pH cercano a la neutralidad (Tabla 6.3).

Los digestores M1 y T1, cuyo sustrato fue el mismo y aunque mostraron algunas variaciones de alcalinidad, prácticamente se mantuvieron en el mismo rango tanto en la relación de alcalinidades como en la producción de biogás. Se observó que ambos digestores tienden a una mayor estabilidad alcanzando en M1 un TRH de 14.3 días, que se encuentra dentro del reportado en la literatura para el proceso de mesofilia. Por su parte, en el digestor T1 no fue posible alcanzar los TRH reportados en la literatura (10 días); sin embargo, su tiempo fue mejor al reportado por Castro (2001) el cual fue de 20 días.

El digestor M2 y T2 presentaron problemas relacionados con la acumulación de los AGV's, específicamente de ácido propiónico encontrándose en ocasiones por arriba de los 4000 mg/L y 1500 mg/L para M2 y T2 respectivamente, así como fugas que se presentaron en diversas ocasiones en ambos digestores. Por este motivo se realizaron reducciones en las cargas de alimentación del digestor M2 con el fin de ayudar a la estabilización del proceso y evitar su acidificación por una sobrecarga del sistema. En cuanto a los dos digestores M1 y T1 las concentraciones de AGV's se encontraron por debajo de los 1000 mg/L. En estos reactores también se presentaron fugas pero con menos frecuencia, en ellos no fue necesario realizar ningún cambio ya que tenían una pronta recuperación.

Tanto M2 como T2, alimentados con lodo TPA, aumentaron de manera constante su composición de metano encontrándose por arriba del 60%, aunque con muchas variaciones en su funcionamiento. Presentaron una capacidad amortiguadora relativamente buena de  $>3000$  mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , la relación de alcalinidades en ambos

digestores nunca sobre pasó el 0.5 (valor manejado para un reactor estable), sin embargo estos valores bajos de alfa están relacionados con la gran cantidad de ácidos grasos encontrados en los sistemas, los cuales se debieron en gran medida al lodo de alimentación.

A excepción del digestor M2 el cual presentó un %CH<sub>4</sub> del 61% todos los demás mantuvieron un porcentaje superior al 65% marcado como el mínimo para un proceso óptimo (Malina y Pohland, 1992). La producción específica de biogás para M1 y T1 fue de 152 y 206 ml CH<sub>4</sub> TPN/g SSV<sub>eliminado</sub> mientras que para M2 y T2 fue de 47 y 159 ml CH<sub>4</sub> TPN/g SSV<sub>eliminado</sub> respectivamente, para hacer un comparativo con la literatura se tiene que M1, M2, T1 y T2 equivalen a 0.152, 0.047, 0.206 y 0.159 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> TPN/kg SSV<sub>eliminado</sub>. Cabe señalar que estos valores son inferiores al rango señalado en la bibliografía para la producción de biogás en digestores de lodos que va de 0.75 a 1.12 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> TPN/kg SSV<sub>eliminado</sub> (Noyola, 1998b).

Por otra parte el mayor %RSV lo tuvo el digestor T1 presentando un valor de 45 % seguido por el digestor M1 con un valor de 39% en el caso de M2 y T2 tuvieron valores muy cercanos, encontrándose con 23 y 24 % respectivamente. Los valores anteriores muestran que la estabilización puede mejorar, ya que un lodo con un buen grado de estabilización alcanza valores de 40 - 60% (WEF, 1993).

No se logró la reducción de coliformes fecales a niveles inferiores del límite máximo permisible para biosólidos clase A (1000 NMP/gST) establecido por US EPA y propuesto por la NOM-004-SMARNAT-2002; sin embargo se logra cumplir con lo estipulado para biosólidos clase B ( $2 \times 10^6$  NMP/gST) en la US EPA y con la clase C ( $2 \times 10^6$  NMP/gST) para la NOM-004-SMARNAT-2002. En la tesis realizada por Castro (2001) se obtuvieron buenos resultados de reducción de coliformes fecales para los digestores termofílicos, logrando cumplir con los criterios establecidos para la clase A con TRH de 20 días en ambos digestores, mientras que para los reactores mesofílicos con TRH de 15 y 35 días se cumplió con la

---

clase B para US EPA. Con lo anterior se puede establecer que la eficiencia de reducción de patógenos en lodos estabilizados por vía anaerobia mesofílica, está por debajo de la lograda por medio de la digestión anaerobia termofílica.

Los digestores termofílicos mantuvieron una temperatura de entre 47 y 51°C durante todo este tiempo, no se pudo lograr subir la temperatura aun más ya que existían deficiencias en el intercambiador de calor; en cuanto a los mesofílicos mantenían una temperatura de 35°C; ésta temperatura fue controlada de manera externa.

Otro problema de importancia que presentó el arreglo experimental fue el sistema de medición de biogás, ya que cada vez que se presentaba algún derrame o simplemente que no se tenía producción, se tenían problemas en la presión interna al generar un vacío, estabilizando el sistema a través de la succión de agua y por lo tanto aumentando el volumen interno. Sin embargo ello no influyó en el porcentaje de metano obtenido en cada reactor.

Al analizar las tablas de resultados se observa que en los cuatro digestores todos los parámetros de control se encuentran dentro de los recomendados para el proceso óptimo a excepción de los AGV's en los reactores M2 y T2. Como ya se habla mencionado anteriormente, la alta concentración de AGV's en estos reactores se debió en gran medida a que la concentración de AGV's del lodo de alimentación era superior a 1000 mg/l. En cuanto a la producción de biogás, parámetro de respuesta con el que tampoco se cumple, estos reactores son los que presentaron mayores problemas con las fugas del gas. Al no haber remoción de microorganismos patógenos se deduce que no permanecen el tiempo necesario dentro del reactor para su eliminación. Ello conduce a pensar que el mezclado y/o agitación es el factor que está limitando el proceso, reduciendo la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.



Es necesario que en el sistema se realicen ciertos cambios para mejorar la eliminación de microorganismos parásitos y patógenos. En cuanto a los AGV's se tendría que llevar un mejor seguimiento para evitar la acidificación de los reactores. Todos los demás parámetros pueden ser controlados hasta cierto punto con un mejor cuidado del proceso.

## 7. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos durante la operación de los digestores todos mantuvieron un nivel adecuado de pH y alcalinidad, así como M1 y T1 una relación de alcalinidades óptima, en el caso de M2 y T2 siempre fue inferior. Los reactores alimentados con lodo TPA en general presentaron valores inferiores a los estipulados para un buen proceso de la digestión anaerobia.
- En los resultados obtenidos en la reducción de SSV se encontró que M2 y T2 presentaron valores que se sitúan por debajo del intervalo de estabilización mencionado en la literatura para digestores de lodos, mientras que T1 es ligeramente superior y M1 se encuentra cercano al límite marcado como mínimo.
- Para este caso en específico tanto los digestores mesofílicos como los termofílicos no resultaron ser eficientes en la reducción de parásitos y patógenos por lo que no cumplieron con las especificaciones marcadas por la US EPA y NOM-004-SEMARNAT-2002 para un lodo de clase A.
- El factor más importante para la eliminación de los microorganismos parásitos es la temperatura; así como el tiempo de permanencia de los lodos dentro del digestor. La eficiencia de la digestión anaerobia termofílica aumenta con la elevación de la temperatura para estos organismos patógenos.
- Para mejorar la eficiencia del proceso se debe tener un mejor control de los AGV's y del sistema de medición de biogás. Con el control oportuno de los AGV's logrará eficientar el proceso de digestión anaerobia y evitar la acidificación de los reactores; con ello se podrán obtener mejores porcentajes de producción de metano. Al mejorar el sistema de medición de biogás se obtendrán mejores resultados sin tener pérdidas de producción.

- El mezclado es un factor de suma importancia para una buena eficiencia del proceso y dado que no ha existido remoción de microorganismos parásitos, y estando prácticamente todos los parámetros dentro de los valores recomendados para el proceso óptimo de los reactores M1 y T1, se puede concluir que el mezclado es el factor que está afectando severamente el desarrollo del proceso de digestión. En el caso de M2 y T2 además del mezclado influyen la cantidad de AGV's encontrados en los efluentes y el lodo de alimentación. Dicho lo anterior, se recomienda cambiar el sistema de mezclado por recirculación por uno de agitación mecánica que garantice la homogeneidad del lodo, así como el cambio del sistema de calentamiento.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- Aiken Michel D. and Mullennix R. W. (1992).** "Another Look at thermophilic Anaerobic Digestion of Wastewater Sludge". *Water Environmental Research* Vol. 64 No. 7 pp 915 - 919.
- APHA. AWWA. WPCF. (1990).** "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". USA. (Métodos normalizados para el análisis de aguas y aguas residuales) 19ª Edición E.U.A..
- Arvizu Fernández J.L. (1981).** "La digestión anaerobia de residuos orgánicos". Trabajo monográfico. UNAM, FQ.
- Cabirol, N., Noyola, R.A., Ortega, L.S., Barragán, E.J., Castro, O.L.P., Rojas, O.M., Vargas, T.G. (1999).** Digestión anaerobia termofílica y mesofílica de lodos biológicos y lodos de tratamiento primario avanzado como una alternativa para la generación de biosólidos. Informe elaborado para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH). Proyecto 9380. Segunda etapa. Pp. 81.
- Castro, A., Pliego, Y., Durán, C. (1997).** "Tratamiento anaerobio de lodos de purga de una planta de lodos activados". PIQAYQA. Serie: Química Ambiental del Agua, vol. 4, pp 206.
- Castro, O. L. P. (2001).** Remoción de parásitos (huevos de helminto) y patógenos (coniformes fecales) por digestión anaerobia de lodos en mesofilia y termofilia.
- Cifuentes, E., et al. (1993).** "Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México". *Salud Pública de México*, vol. 35, No. 6, pp 614 – 619.
- Environmental Protection Agency. (1996).** "A Guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule". Estados Unidos de América.
- Environmental Protection Agency. (1996).** "A plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule". Estados Unidos de América.
- Gujer, W. and Zehnder, J. B. (1983).** "Conversion Process in Anaerobic Digestion". *Wat. Sci. Technol.* 5: 127 - 167.
- Hamer, G., Bayers, J. D. and Berger, J. (1985).** "Thermophilic Anaerobic Digestion for Sewage Sludge Stabilization". *Acta Biotechnol.* Vol. 5, No. 3, pp 225 - 234.
- Hernández, A..** "Dupuración de aguas residuales". 4 ed., Ed. Colección Semor, pp 8 – 599.

- Jenkins S.R., Morgan J.M. y Sawyer C.L. (1983).** "Measuring anaerobic sludge digestion and growth by a simple alkalimetric titration". *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 448-453.
- Krugel, N. and Peddi. (1998).** "Extending Thermophilic Anaerobic Digestion for Producing Class "A" Biosolids at the Greater Vancouver Regional Districts Annacis Island Wastewater Treatment Plant". *Water Science & Technology*. Vol. 38 No. 8 - 9, pp 409 - 416.
- Lepisto, S. and Rintala, J.A. (1995).** "Thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: start-up with material from a mesophilic process". *Environmental Technology*. Vol. 16 pp 157 - 164.
- Lettinga G., et al. (1980).** "Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 22, pp 699 - 734.
- López, R. R. (2000).** Apuntes de tratamiento de aguas residuales. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Lotito, V., Spinosa, L., Mininni, G. and Antonacci, R. (1997).** "The rheology of sewage sludge at different steps of treatment". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 36, N. 11, pp 79-85.
- Malina, J.F. and Pholand, F.G. (1992).** Design of anaerobic process for the treatment of industrial and municipal wastes. Technomic Publishing Co. USA. 214 pp.
- Mancebo del Castillo, U. (2001).** Digestión anaerobia no convencional de lodos combinados, utilizando un reactor tipo UASB. UNAM. Tesis de Maestría.
- Metcalf & Eddy. (1991).** *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, Reuse*". 3ª Ed., 2º Tomo. McGraw-Hill, pp 753 - 1485.
- Metcalf & Eddy. (1996).** *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, Reuse*". 3ª Ed., 2º Tomo. McGraw-Hill, pp 753 - 1485.
- Moeller, G. and Torres, L. G. (1997).** "Rheological characterization of primary and secondary sludges treated by both aerobic and anaerobic digestion". *Bioresource Technology* 61, pp 207-211.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996.** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. 06 de enero de 1997.

**Norma Oficial Mexicana. NOM-004-SEMARNAT-2002.** Protección ambiental – Lodo y biosólidos – Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. 18 de febrero del 2002.

**Noyola, A. (1998).** “Diseño, inoculación y arranque de reactores UASB”. Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 133 - 143.

**Noyola, A. (1998).** “Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”. Curso Organizado por la División de Aguas Servidas (DIASE). Lima, Perú.

**Noyola, A. (1998a).** Anaerobio vs. Aerobio, un debate (casi) superado. Biológico vs. primario avanzado, ¿el nuevo debate?. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Núm. 34. Enero-Febrero. pp 10-14.

**Noyola, A. (1998b).** Digestión anaerobia de lodos. *Memorias del curso “Digestión anaerobia de lodos y aguas residuales”*. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, A.C. México.

**Noyola, A., Ortega, L. S., Castro, L. P., Rojas, M. (1998).** “Digestión anaerobia termofílica y mesofílica de lodos biológicos de desecho para producción de biosólidos como mejoradores de suelos (Primera Etapa)”. Informe elaborado para la DGCOH. (Convenio 8-co4-1-0790).

**Proste, R. L. (1997).** “Theory and practice of water and wastewater treatment”. Ed. John Wiley & Sons.Inc.

**Qasim, S. (1994).** “Wastewater treatment plants”. Technomic Publishing Co. USA. 726 pp.

**Ramalho, R. S. (1983).** “Introduction to Wastewater Treatment Process”. 2ª Edition. Academic Press. New York.

**Rojas, O. M. (2001).** Remoción de patógenos y parásitos (coniformes fecales y huevos de helminto) durante el tratamiento de lodos por digestión anaerobia bajo condiciones de termofilia y mesofilia. Tesis de licenciatura, Biología. FES Iztacala. Pp. 90.

**Romero, R. J. A. (1999).** Tratamiento de aguas residuales. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. Pp. 1247.

**Saval, S. y Noyola, A. (1992).** “Aportaciones de la Biotecnología al Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”. *Biotecnología* 2(5 y 6): 155 - 172.

**SEMARNAT (1993).** Norma Oficial Mexicana MON-052-ECOL/93, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que

---

hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación. 22 de octubre de 1993.

**Sociedad de Ingenieros Civiles.** "Desing of Municipal Wastewater Treatment Plants". WEF Manual de practicas No. 8, vol. I y II.

**Tchobanoglous, G. et al. (1994).** "Gestión integral de residuos sólidos". Vol. II. McGraw-Hill. México. Pp 755 - 780. Cap. 14.

**Uemura, S., Harada, H. (1993).** "Microbial characteristics of methanogenic sludge consortia developed in thermophilic UASB reactors". Appl. Microbiol. and Biothechnol. Vol. 39, pp 654 – 660.

**Van Lier, J. B. (1996).** "Lirmitations of thermophilic anaerobic waste water treatment and the consequences for process desing". Antinie van Leeuwenhoek. Vol. 69, pp. 1 - 14.

**Van Lier, J. B., Grolle K. C. F., et al. (1992).** "Start-up of a thermophilic upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor with mesophilic granular sludge". Appl. Microbiol. and Biotechnol. Vol. 37, pp 130 – 135.

**Water Environment Federation (1993).** "Sludgge stabilization". Manual of practice No. FD-9. USA. 105 pp.

**Winkler, M. (1986).** Tratamiento biológico de aguas de desecho. Editorial Limusa. México. Pp. 323.

---

## GLOSARIO

- **Bacterias aerobias** (*aerobe*). Organismos que crecen en presencia de O<sub>2</sub>; pueden ser facultativos, estrictos o microaerofílicos. El proceso de degradación biológica que ellas realizan se denomina oxidación o descomposición aeróbica, y ocurre en presencia de oxígeno disuelto sin la producción de olores desagradables.
- **Bacterias anaerobias** (*anaerobe*). Organismos que se desarrollan en ausencia de O<sub>2</sub> y deben obtenerlo del existente en los sólidos orgánicos. Algunos pueden incluso morir en presencia de O<sub>2</sub>. el proceso de degradación que ellas realizan recibe el nombre de descomposición anaeróbica. Es precisamente este proceso de descomposición, en ausencia de oxígeno, el cual produce olores desagradables producto de los gases que dichas bacterias liberan en su proceso metabólico (H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, etc.).
- **Bacterias metanogénicas**. Grupo especializado de bacterias anaerobias obligadas que descompone la materia orgánica y forma metano.
- **Biomasa**. Abreviatura de masa biológica. La biomasa se mide en cantidad de materia por unidad de superficie o de volumen. Puede utilizarse como materia prima renovable, así como energía material. Un uso ingenioso de la biomasa es el compost.
- **Condiciones mesofílicas**. Para que sean llamadas condiciones mesofílicas se tiene que encontrar entre el intervalo de temperatura de 20-50 °C, aunque siempre se maneja el óptimo que es de 35°C.
- **Condiciones termofílicas**. Se maneja un intervalo de temperatura de 45-75°C con un óptimo de 55°C
- **Grupos tróficos**. Clasificación de microorganismos con base en su alimentación.
- **Lodos activados**. Proceso biológico para el tratamiento de las aguas residuales con biomasa en suspensión.
- **Metanogénesis**. Supone la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y dióxido de carbono.



- **Sintrofia** (*syntrophy*). Situación nutricional en la que dos o más organismos combinan sus capacidades metabólicas para catabolizar una sustancia que no puede ser catabolizada individualmente por ninguno de los dos, también llamado alimentación cruzada, puede deberse también a la disponibilidad de vitaminas o de provitaminas.
- **Simbiosis** (*symbiosis*). Relación entre dos organismos.