

40



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

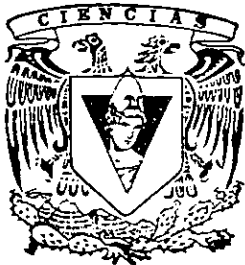
FACULTAD DE CIENCIAS

REMOCION DE PARASITOS (HUEVOS DE HELMINTO) Y PATOGENOS (COLIFORMES FECALES) POR DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS EN MESOFILIA Y TERMOFILIA

299636

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE BIOLOGA PRESENTA: LOURDES PATRICIA CASTRO ORTIZ



DIRECTOR DE ESTUDIOS PROFESIONALES DE TESIS: DR. DALBERTO NOYOLA ROBLES





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA

Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito: **Remoción de parásitos (huevos de helminto) y patógenos (coliformes fecales) por digestión anaerobia - de lodos en mesofilia y termofilia.**

realizado por **Castro Ortíz Lourdes Patricia**

con número de cuenta 9133509-4 , quién cubrió los créditos de la carrera de **Biología.**

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

- Director de Tesis **Dr. Adalberto Noyola Robles**
- Propietario **M. en C. Jorge Manuel Romero Jarero**
- Propietario **M. en C. Isabel Cristina Cañeda Guzmán**
- Suplente **M. en C. Gloria Moreno Rodríguez**
- Suplente **Biól. Lucila Mendoza Sánchez**

FACULTAD DE CIENCIAS
U. N. A. M.

Consejo Departamental de Biología

Dra. Patricia Ramos Morales



DEPARTAMENTO
DE BIOLOGÍA

Dedicatoria

Con especial cariño a mis padres, que siempre me brindaron su apoyo incondicional.

A mis hermanos Alejandro y Pedro que aunque nunca me lo dijeron siempre estuvieron en los momentos en que más los necesite para darme ánimos y su apoyo durante este trayecto de mi vida.

A mis queridos y grandes amigos que me brindaron todo su apoyo en los momentos más difíciles que pase como estudiante y que compartieron con migo tantos momentos alegres y tristes.

Con todo mi cariño a todas esas personas que siempre estuvieron a mi lado y que muchas veces no supe ver. Así como a mis queridos sobrinos, Osvaldo y Stefani, para que este trabajo sea un aliciente para ellos en su vida futura..

Agradecimientos

A *Dios* por permitirme llegar hasta este momento de mi vida con las personas que más quiero y por permitirme culminar de manera integra una etapa de la vida que me presto.

A mis padres Sr. Nicolás Castro Gaytan y la Sra. Concepción Ortiz León por su apoyo y consejos.

A todos aquellos que compartieron mis momentos escolares y me brindaron todo su apoyo especialmente a mis queridos amigos Merle, Lety, Antonio, Oliva, Almita etc. Que siempre me ayudaron en todo. Así también quiero agradecer de manera muy especial a mi amigo Germán Zalgado Velázquez ya que sin su ayuda no habría sido posible terminar este trabajo gracias por tus enseñanzas y apoyo.

Un especial agradecimiento al Dr. Adalberto Noyola Robles por permitirme integrarme a uno de sus grupos de trabajo y adentrarme a un área que no conocía así como al Instituto de Ingeniería por permitirme realizar la fase experimental en sus instalaciones y a la DGCOH por el apoyo que brindo a este proyecto.

CONTENIDO

Contenido	I
Nomenclatura	III
Lista de tablas	IV
Lista de figuras	V
Resumen	VII
1.- Introducción	1
2.- Objetivos.....	3
3.- Marco teórico.....	4
3.1- Los lodos residuales y sus características.....	4
3.2- Tratamiento de los lodos	7
3.2.1 Estabilización	10
3.3.- Tratamiento anaerobio de los lodos	13
3.3.1 Antecedentes	13
3.3.2 Aspectos microbiológicos generales	15
3.3.3 Bioquímica y microbiología de la digestión anaerobia	19
3.3.4 Factores ambientales	27
3.3.4.1 Temperatura	27
3.3.4.2 pH y alcalinidad	32
3.3.4.3 Nutrientes	33
3.5.- Parásitos y patógenos presentes en los lodos residuales.....	34

3.5.1 Organismos indicadores de contaminación.....	36
3.5.2 Helmintos en México	38
3.5.3 Helmintos de importancia médica.....	39
3.5.3.1 Clase Nemátoda	39
3.5.3.2 Clase Céstoda	55
4.- Desarrollo experimental	66
4.1 Descripción del dispositivo experimental	66
4.2 Condiciones de operación y análisis de los digestores	68
4.3 Preparación de los lodos de alimentación	72
5.- Resultados y discusión	75
5.1 Parámetros fisicoquímicos.....	75
5.2 Biodigestores M1 y M2	84
5.3 Biodigestores T1 y T2	86
5.4 Biodigestores mesofílicos y termofílicos	88
5.5 Seguimiento de los microorganismos patógenos y parásitos	95
6.- Conclusiones	107
7.- Recomendaciones	109
8.- Bibliografía	110
Anexo 1 Técnica NOM – ECOL – 001 – 1996	
Anexo 2 Técnicas analíticas y cálculos	
Anexo 3 Resultados fisicoquímicos y microbiológicos.	

Nomenclatura

AGV's	Acidos grasos volátiles
Bv	Carga orgánica volumétrica
HH	Huevos de helmintos
M1	Digestor mesofílico 1
M2	Digestor mesofílico 2
NMP	Número más probable
Q	Caudal
RSV	Reducción de la fracción de sólidos volátiles.
ST	Sólidos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
T1	Digestor termofílico 1
T2	Digestor termofílico 2
TPA	Tratamiento primario avanzado
TPN	Temperatura y presión normal
TRH	Tiempo de retención hidráulico
UFC	Unidad formadora de colonia

Lista de Tablas

3.1 Contenido típico de metales pesados en los lodos residuales	5
3.2 Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia de lodos	14
3.3 Clasificación de los organismos según sus fuentes de energía y carbono	15
3.4 Características de algunas bacterias productoras de metano.....	25
3.5 Intervalos típicos de temperatura para diverso microorganismos	28
3.6 Características del procesos de digestión anaerobia de acuerdo con el intervalo de temperatura en que se lleva acabo la metanogénesis	30
3.7 Principales organismos patógenos y parásitos presentes en los lodos residuales	35
3.8 Porcentajes de helmintiasis en la República Mexicana	38
3.9 Porcentaje de población infantil infectada por parásitos	39
4.1 Parámetros y análisis que fueron evaluados en el presente estudio	70
4.2 Condiciones de operación de los digestores	71
5.1 Datos de los lodos biológicos aerobios de alimentación de los digestores M1 y T1.....	75
5.2 Datos de los lodos fisicoquímicos de alimentación de los digestores M2 y T2.....	76
5.3 Concentración de metales pesados en el lodo de entrada TPA así como en los lodos de salida de los digestores M2 y T2	86
5.4 Parámetros promedio de operación de los digestores	90
5.5 Condiciones promedio de operación de los digestores	92
5.6 Comparación de algunos parámetros de operación de los digestores en la etapa de arranque, segunda etapa y lo reportado en la literatura	93
5.7 Comparación de los huevos de <i>Ascaris</i> sp. totales presentes en el lodo biológico; así como en los digestores M1 y T1.....	99
5.8 Comparación de HH totales presentes en el lodo biológico así como en los digestoresM1 y T1.....	100
5.9 Comparación de huevos de <i>Ascaris</i> sp. presentes en lodo TPA; así como en los digestores M2 y T2	102
5.10 Comparación de huevos de <i>Ascaris</i> sp. presentes en lodo TPA; así como en los digestores M2 y T2.....	103

Lista de figuras

3.1 Esquema global de la β - oxidación de los ácidos grasos	21
3.2 Diagrama general de la digestión anaerobia y géneros microbianos involucrados en el proceso	24
3.3 Ciclo de vida del nemátodo <i>Ascaris lumbricoides</i>	43
3.4 Ciclo de vida del nemátodo <i>Trichuris trichiura</i>	46
3.5 Ciclo de vida del nemátodo <i>Enterobius vermicularis</i>	49
3.6 Ciclo de vida del nemátodo <i>Strongyloides stercoralis</i>	52
3.7 Ciclo de vida del cestodo <i>Taenia solium</i>	57
3.8 Ciclo de vida del cestodo <i>Taenia saginata</i>	60
3.9 Ciclo de vida del cestodo <i>Hymenolepis nana</i>	63
4.1 Esquema que muestra la configuración de los digestores A) termofilicos y B) mesofilicos	67
5.1 Evolución del pH y de la alcalinidad en el digestor M1	77
5.2 Composición y producción de biogás en el digestor M1	77
5.3 Cargas orgánicas de entrada y de salida en el digestor M1	78
5.4 Evolución del pH y de la alcalinidad en el digestor M2	79
5.5 Composición y producción de biogás en el digestor M2	79
5.6 Cargas orgánicas de entrada y de salida en el digestor M2	80
5.7 Evolución del pH y de la alcalinidad en el digestor T1	80
5.8 Composición y producción de biogás en el digestor T1	81
5.9 Cargas orgánicas de entrada y de salida en el digestor T1	81
5.10 Evolución del pH y de la alcalinidad en el digestor T2	82
5.11 Composición y producción de biogás en el digestor T2	83
5.12 Cargas orgánicas de entrada y de salida en el digestor T2	83
5.13 Número más probable de coliformes fecales en el digestor mesofílico alimentado con lodo biológico	94

5.14 Número más probable de coliformes fecales en el digestor mesofílico alimentado con lodo TPA.....	95
5.15 Número más probable de coliformes fecales en el digestor termofílico alimentado con lodo biológico	96
5.16 Número más probable de coliformes fecales en el digestor termofílico alimentado con lodo TPA	97
5.17 Porcentajes encontrados de huevos de helmintos en el digestor M1 alimentado con lodo biológico.....	98
5.18 Número total de huevos de <i>Ascaris</i> sp. encontrados en el lodo biológico así como en los digestores M1 y T1.....	101
5.19 Número total de huevos de <i>Ascaris</i> sp. encontrados en el lodo crudo TPA así como en los digestores M2 y T2	103
5.20 Fotografías de A) Huevo infértil de <i>Ascaris</i> sp., B) Huevo fértil, presentando larva en estadio L2.....	104
5.21 Huevo infértil de <i>Hymenolepis</i> sp.....	105
5.22 Fotografía de huevo eclosionando de <i>Toxocara</i> sp.....	105
5.23 Huevo infértil de <i>Trichuris</i> sp.....	106

Resumen

En el presente trabajo se realizó una evaluación del funcionamiento de cuatro digestores anaerobios de lodo, con la finalidad de lograr la estabilización de estos residuos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Se realizó el seguimiento de los parámetros considerados más importantes para este tipo de procesos que son: relación de alcalinidades (alfa), pH, temperatura, ácidos grasos volátiles (AGV's) y sólidos (en todas sus formas) además de realizar a los lodos obtenidos después del tratamiento los respectivos análisis microbiológicos de coliformes fecales y huevos de helminto.

Además de validar que la digestión anaerobia es un proceso adecuado para lograr la estabilización de los lodos tanto biológicos como fisicoquímicos, era necesario determinar a que temperatura se lograba una mejor estabilización, motivo por el cual se trabajaron los dos intervalos de temperatura dentro de los cuales es posible que se lleve a cabo este proceso. Para ello se trabajaron dos digestores mesofílicos (35°C) marcados como M1 y M2 y dos digestores termofílicos (55°C) marcados como T1 y T2. Los lodos utilizados fueron obtenidos de la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en el "Cerro de la Estrella", siendo este el lodo biológico aerobio que fue el sustrato de alimentación de los digestores M1 y T1, así como de una planta de tratamiento de aguas por un método fisicoquímico, lodo TPA, ubicada en San Pedro Atocpan; este fue el sustrato de alimentación de los digestores M2 y T2.

Los resultados obtenidos mostraron una producción de biogás promedio de 51.1 ml CH₄TPN/g SSV_{alim.} en los digestores mesofílicos y de un 37.1 ml CH₄TPN/g SSV_{alim.} en los digestores termofílicos. La composición de CH₄ fue de un 48% en el digestor T1 y de hasta un 68% de metano en los digestores M1 y M2.

En cuanto a los resultados microbiológicos, se encontró que la digestión anaerobia termofílica presentó un porcentaje de remoción de huevos de helminto para el lodo biológico (T1) de 95.8% y un 28.6% para la mesofilia. Para el lodo TPA, los resultados obtenidos para el digestor T2 muestran que se logró una remoción de HH de un 98.6%. En cuanto a los indicadores de contaminación fecal, patógenos, coliformes fecales, los resultados obtenidos mostraron que en termofilia se tienen menos de 1000 NMP/g ST para ambos tipos de lodos, mientras que para la digestión anaerobia mesofílica se tienen 2×10⁶ NMP/g ST para ambos casos. El proceso termofílico logró alcanzar los límites establecidos en la norma NOM - 004 - ECOL - 2000 (en preparación) para la obtención de biosólidos clase A.

Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que la digestión anaerobia termofílica es un proceso más eficiente que la mesofílica, para lograr la reducción tanto de la materia orgánica como de los patógenos y parásitos presentes en los lodos residuales.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los procesos de depuración, tanto de aguas potables como de aguas residuales, se producen lodos, los cuales constituyen un desecho de suma importancia. De hecho, los lodos producidos constituyen una suspensión concentrada de los contaminantes presentes en las aguas residuales crudas y, en consecuencia, contienen altas concentraciones de microorganismos (parásitos y patógenos); así como una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos. La materia orgánica tiene capacidad de putrescibilidad, lo que junto con la presencia de patógenos y parásitos hace indispensable la estabilización de estos lodos. Esto consiste en reducir la fracción volátil de los lodos y en la destrucción de los microorganismos que presentan un riesgo para la salud pública.

Es por estos problemas que es necesaria una opción para evitar o reducir de la mejor manera posible la contaminación al ambiente, generada por este subproducto, además de reducir los riesgos de contagio al hombre de los diversos microorganismos patógenos y parásitos presentes en los lodos.

Para enfrentar este problema, este trabajo propone la estabilización de los lodos de desecho por medio de la digestión anaerobia tanto mesofílica como termofílica. Para lo anterior, se llevó a cabo un estudio a nivel laboratorio tomando en cuenta los dos intervalos de temperatura a la cual es posible llevar a cabo óptimamente este proceso, con la finalidad de comparar la eficiencia de ambos tratamientos.

a) mesofilia.- cuyo intervalo de temperatura oscila entre los 20 – 40°C teniendo su óptimo en 35°C y b) termofilia.- cuya temperatura de funcionamiento es superior a los 45°C siendo la temperatura óptima 55°C. Se trabajó con ambas temperaturas con el fin de hacer una comparación en la eficiencia de remoción de materia orgánica (sólidos suspendidos volátiles), organismos patógenos y parásitos que se encuentran presentes en los lodos.

El presente trabajo evalúa las posibilidades de utilizar este método, digestión anaerobia, de estabilización como una opción que permita el uso benéfico de los lodos mediante su cumplimiento con la regulación nacional en la materia. De esta forma, se lograría una disposición final más eficiente y económica, además de reducir al mínimo los daños al medio en que sean depositados.

2. OBJETIVOS

2.1 General:

- Determinar la eficacia del tratamiento de digestión anaerobia como una alternativa para la estabilización de lodos biológicos y fisicoquímicos, provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como verificar la eficacia de este tratamiento para la remoción de patógenos y parásitos, con el fin de cumplir con la normatividad ambiental en la materia.

2.2 Particulares:

- Hacer una comparación doble de la eficacia del tratamiento de digestión anaerobia tanto en condiciones de mesofilia como de termofilia, así como con lodo biológico y un lodo del tratamiento primario avanzado (TPA).
- Verificar la eficacia de este tipo de tratamiento para la remoción de patógenos (coliformes fecales) y parásitos (huevos de helmintos) en ambos tipos de lodos y a ambas temperaturas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 LOS LODOS RESIDUALES Y SUS CARACTERÍSTICAS

Las plantas de tratamiento generan diferentes tipos de lodos residuales de acuerdo con el tipo y modo de explotación de la misma planta.

De acuerdo con su origen, los lodos residuales pueden clasificarse de la siguiente forma:

· Lodos primarios: Son aquellos lodos provenientes de las operaciones de separación sólido – líquido como pueden ser la sedimentación ó flotación, etc.

· Lodos secundarios: Son los lodos provenientes de los procesos biológicos.

Lodos químicos: Lodos provenientes de los procesos químicos (coagulación).

Además, los lodos producidos en una planta de tratamiento varían de acuerdo con el tipo de agua residual a tratar; en tal caso pueden ser de dos tipos: a) doméstica o municipal e b) industrial.

Las diferentes características de los lodos, que condicionan de manera directa el que estos puedan ser aplicados a los terrenos y que se puedan obtener usos benéficos incluyen: el contenido de materia orgánica medida como sólidos volátiles (SV), cantidad de nutrientes; así como de organismos patógenos y parásitos.

Otro elemento importante, sobre todo en el caso de aguas residuales industriales, es el contenido de metales pesados (Tabla 3.1), así como algunos compuestos orgánicos tóxicos.

Algunos de los parámetros más empleados para definir las características tanto físicas como químicas de los lodos son las que se mencionan a continuación:

- Sólidos totales (ST) y suspendidos (SST)
- Sólidos totales volátiles (STV) y suspendidos volátiles (SSV)
- Materia orgánica medida como STV; SSV; DQO y COT (mg/L)
- Nitrógeno
- Fósforo
- Alcalinidad (mg/L CaCO₃)
- pH
- Metales pesados (mg/L)

Tabla 3.1. Contenido típico de metales pesados en los lodos residuales.

Metal	Lodo seco mg/kg.	
	Intervalo	Mediana
As	1,1 - 230	10
Cd	1 - 3,410	10
Cr	10 - 99,000	500
Co	1,3 - 2490	30
Fe	1,000 - 154,000	17,000
Pb	13 - 26,000	5000
Mn	32 - 9,870	260
Mg	0,6 - 56	6
Mo	0,1 - 214	4
Ni	2 - 5,300	80
Se	1,7 - 17,2	5
Sn	2,6 - 329	14
Zn	101 - 49,000	1,700

Tomado de Metcalf y Eddy, Tomo 2. 1996

A lo anterior hay que agregar sus propiedades reológicas, que son muy importantes para el bombeo y transporte de los lodos, así como el tipo de agua contenida en los lodos. El agua está formada por agua libre (que es fácilmente eliminada) y por agua de enlace; la cantidad de agua que se encuentre presente en los lodos determina su capacidad de deshidratación (Ramírez, 1992).

Debido a sus características y composición, los lodos residuales no pueden ser depositados directamente en el medio ambiente, ya que ocasionarían problemas tanto de olores como contaminación del lugar de depósito. Esto se debe a las concentraciones en que se encuentran los contaminantes químicos; así como a la materia orgánica, que aún no ha sido totalmente degradada a compuestos más estables, lo que lleva a la producción de olores desagradables y a la atracción de vectores (ratas, moscas). Además, la consistencia de los lodos hace que sea un problema su transporte y disposición final.

Por estos motivos, se considera necesario el tratamiento de los lodos residuales con el fin de lograr la estabilización de la materia orgánica, alcanzar un alto grado de eliminación de microorganismos tanto patógenos como parásitos que se encuentran en los mismos, además de eliminar la mayor cantidad de agua posible para facilitar su transporte y su disposición en lugares adecuados

3.2 Tratamiento de los lodos

El tratamiento y la disposición de los lodos, producto de desecho de la depuración del agua, es uno de los aspectos más descuidados en México en materia de control ambiental.

La EPA (Environmental Protection Agency, 1996) en su apartado 503 establece los requerimientos tanto para el reuso como para la disposición final de los lodos de desecho (biosólidos) cuando:

- Son aplicados como fertilizantes para cultivos agrícolas u otros tipos de vegetación.
- Se descargan en un sitio de disposición final.
- Son incinerados.

A si mismo, la EPA clasifica a los biosólidos en dos clases, basándose en los requerimientos de eliminación de patógenos: lodos clase "A" y clase "B". En México, al parecer este criterio se aplicará, con algunas restricciones, en la norma en la que se trabaja actualmente (NOM – ECOL – 004; en preparación).

La EPA considera biosólidos clase "A" aquellos cuyo nivel de coliformes fecales sea menor a 1000 como número más probable por gramo de sólidos totales en peso seco (NMP/g ST). Los biosólidos clase "B" son aquellos cuyo nivel de coliformes fecales se encuentre por debajo de 2×10^6 NMP/g ST.

Además, la cantidad de huevos de helmintos debe ser menor a 1 por cuatro gramos de ST peso seco para poder ser considerados como clase "A". Esta regla también se enfoca al seguimiento de otros dos parámetros como base para determinar la calidad de los biosólidos:

- La presencia de metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo, molibdeno, níquel, selenio y zinc).
- El lodo residual como atrayente de vectores (como podrían ser roedores, moscas, mosquitos, etc.)

Los procesos de tratamiento aceptados por la regla 503 de la EPA para la obtención de biosólidos clase "A" se mencionan a continuación:

- Tratamiento térmico: Elevación del pH por arriba de 12 durante 72 hrs. y temperatura superior a 52°C, secado por aire.
- Otros procesos de tratamiento por medio del monitoreo de virus entéricos y huevos de helmintos para demostrar que el proceso verdaderamente los ha reducido. Se debe llegar a una reducción de la densidad de los virus entéricos en menos de una unidad formadora de colonia (UFC) por 4 gramos de sólidos totales peso seco.
- Tratamientos con procesos adicionales para la reducción de patógenos, como son: composteo, secado en caliente, digestión aerobia termofílica (con agitación por oxígeno) y pasteurización.

Por su parte, para que los biosólidos sean considerados clase "B" es necesario:

- Que se realice un seguimiento de los organismos indicadores (coliformes fecales y huevos de helmintos) por dos semanas antes de su disposición.

De esta manera y de acuerdo con la EPA, en su apartado 40 CFR (código federal de regulaciones), en su parte 257, se consideran biosólidos clase "B" a los lodos tratados por medio de la digestión aerobia mesofílica, digestión anaerobia mesofílica y a los tratados por medio de estabilización con cal.

Para esta última clase de biosólidos existen varios tipos de restricciones en cuanto a los sitios de aplicación, ya sean estos lugares de cultivo o lugares a los que el público tenga acceso, como por ejemplo parques o jardines. Al disponer este tipo de biosólidos en algunos de estos lugares se tiene un tiempo límite, que va desde 30 días hasta 2 años después de su aplicación al suelo, para que estas tierras puedan ser utilizadas.

Por lo anterior, los lodos generados en las plantas de tratamiento necesitan de algún tipo de tratamiento que permita un manejo y disposición final adecuados. Dichos tratamientos pueden ser algunos de los siguientes:

- ◇ Espesamiento
- ◇ Elutriación
- ◇ Estabilización (por digestión aerobia o anaerobia, por cal o por composteo)
- ◇ Acondicionamiento
- ◇ Deshidratación
- ◇ Incineración y oxidación húmeda

De estos procesos la digestión, el composteo, la incineración y la oxidación húmeda son utilizados principalmente para el tratamiento de la materia orgánica. Los procesos de espesamiento, deshidratación y secado son usados para remover en determinado grado el agua que contienen los lodos.

3.2.1 Estabilización

La estabilización de los lodos se lleva a cabo para reducir la presencia de patógenos, la eliminación de olores desagradables así como para inhibir, reducir o eliminar su potencial de putrefacción.

Para lograr el cumplimiento de estos objetivos es necesario comprender los efectos de dicha estabilización sobre la fracción orgánica o volátil de los biosólidos. La proliferación de olores y la putrefacción, así como la supervivencia de microorganismos tanto patógenos como parásitos, se producen cuando se permite que los microorganismos se desarrollen incontrolablemente sobre la fracción volátil presente en los lodos a tratar. Los medios para eliminar, o inhibir el desarrollo de estas condiciones son:

- La reducción biológica del contenido de material volátil.
- Oxidación química de la materia volátil.
- Adición de agentes químicos para evitar el desarrollo y supervivencia de microorganismos en general (incluidos patógenos y parásitos) en los biosólidos.
- Aplicación de calor con el objetivo de lograr una desinfección o esterilización de los biosólidos

Las tecnologías de las que se dispone para lograr una buena estabilización de los biosólidos son:

- La estabilización con cal
- El tratamiento térmico
- El compostaje
- La digestión aerobia
- La digestión anaerobia.

◊ La estabilización con cal.- Es un proceso en donde se añade suficiente cal a los lodos por tratar con la finalidad de elevar su pH por arriba de 12, lo que crea un entorno que no favorece la supervivencia de los microorganismos. De esta forma, mientras los lodos sean mantenidos en esas condiciones, se evitará la putrefacción y por lo tanto la presencia de olores desagradables, por lo que no se ocasionarán riesgos a la salud pública.

◊ Tratamiento térmico.- En este tipo de tratamiento el lodo es calentado por un corto periodo de tiempo, dentro de un depósito en el cual alcanzará una temperatura de más de 260°C y una presión superior a los 2.75 kg/cm². El resultado de este tratamiento es la coagulación de los sólidos y la eliminación de su agua intersticial; como consecuencia de esto el lodo es esterilizado, prácticamente desodorizado y fácil de deshidratar con filtros de vacío o filtros prensa sin adición de productos químicos (Metcalf y Eddy, 1991).

↕ Compostaje.- Este es un proceso por medio del cual la materia orgánica sufre una degradación biológica de tipo aerobio hasta lograr un producto estable. Con el uso adecuado de este método de estabilización, la composta producida es un material sin problemas de carácter sanitario, exento de olores y de características similares al humus, esto debido a que el lodo procesado alcanza temperaturas de termofilia por lo que el producto final está prácticamente pasteurizado.

↕ Digestión aerobia.- En este proceso, la estabilización es llevada a cabo por aireación durante un largo periodo de tiempo lo que da como resultado, mediante procesos de metabolismo endógeno, la destrucción celular y la disminución de los sólidos suspendidos volátiles (SSV). Los lodos estabilizados de esta forma no desprenden olores desagradables, presentan un color oscuro y pueden drenarse con cierta facilidad.

↕ Digestión anaerobia.- Este es un proceso cuya finalidad es la degradación de la materia orgánica presente en los lodos y consiste en depositar los lodos en digestores cerrados que impiden la entrada del aire para tener condiciones anaerobias estrictas. En este medio, la materia orgánica es transformada en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) por la actividad de diferentes grupos de microorganismos que interactúan en el sistema (Metcalf y Eddy, 1991). Este proceso es tratado en detalle más adelante.

3.3 TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LODOS

3.3.1 ANTECEDENTES

La digestión de los lodos procedentes de aguas residuales domésticas, empieza en la segunda mitad del siglo XIX, cuando se desarrolla el primer tanque diseñado para separar y retener los sólidos sedimentados del agua residual. Esta primera instalación llevaba el nombre de "eliminador automático Mouras" cuyo inventor fue Louis H. Mouras, de Vesoul, Francia hacia 1860.

El primero en tener conocimiento de la producción de un gas combustible, que contiene metano (CH_4) cuando se hidrolizan los sólidos del agua fue Donald Cameron, quien construyó el primer tanque séptico en 1895, en la ciudad de Exeter, Inglaterra, del que utilizó el biogás para el alumbrado de los alrededores de la planta (Moreno *et al.*, 1993).

En 1904 Karl Imhoff patentó en la ciudad de Alemania un tanque de "doble acción" conocido actualmente como tanque Imhoff.

En el periodo comprendido entre 1920 y 1935 se realizaron estudios más amplios del proceso de digestión anaerobia aplicando calor a los tanques con lo que se lograron mejoras en su diseño así como de los equipos adicionales (Moreno, *et al.*, 1993).

Por medio del proceso de digestión anaerobia se logra la estabilización de los sólidos biodegradables, obteniéndose los siguientes resultados:

- ◇ Producción de lodos inertes, es decir, la materia orgánica biodegradable ya se encuentra agotada.
- ◇ Se logra la reducción de malos olores, del contenido bacteriano; así como del volumen y peso de los lodos.
- ◇ Se reducen los costos en la disposición final y
- ◇ Se protege al medio ambiente así como a la salud humana por la reducción de los organismos parásitos y patógenos.

Como en todo tipo de tratamiento, se tienen tanto ventajas como desventajas: (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia de lodos

Ventajas	Desventajas
Producción de gas metano, el cual puede ser usado como fuente de energía.	El costo de inversión es alto, ya que se requieren tanques con bombas para la recirculación del lodo, así como compresores para gas.
Reducción del volumen y la masa de los lodos seguido de la conversión de la materia orgánica y de los sólidos volátiles a metano y CO ₂ .	Largos tiempos de retención, en ocasiones mayores de 10 días, son requeridos para desarrollar y mantener a las poblaciones de bacterias productoras de metano.
Producción de residuos sólidos que pueden ser usados como acondicionadores de suelos.	Son procesos muy difíciles de arrancar y de mantener, sobre todo los termofílicos.
Inactivación de una gran cantidad de organismos patógenos.	

3.3.2 Aspectos microbiológicos generales

Antes de entrar de lleno en los aspectos sobre la digestión anaerobia es importante comprender algunas de las características que intervienen en el metabolismo microbiano de este tipo de procesos, como por ejemplo las necesidades nutricionales de los diferentes microorganismos que normalmente se encuentran involucrados.

Para que un organismo lleve a cabo sus funciones vitales, precisa tener una fuente de energía, así como una de carbono para la síntesis de nuevo tejido celular. También requiere elementos inorgánicos que le sirvan como nutrientes tales como: nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y magnesio entre otros. Tal vez le sean necesarios micronutrientes orgánicos, como factores de crecimiento, para poder llevar a cabo la síntesis celular.

Las diferentes formas que tienen los microorganismos para obtener el carbono y la energía necesarias para su buen desarrollo hacen que estos sean clasificados de diversas maneras (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Clasificación de los organismos según sus fuentes de energía y de carbono.

	Fuente de energía	Fuente de carbono
Autótrofos		
Fotoautótrofos	Luz	CO ₂
Quimioautótrofos	Reacción inorgánica de oxido - reducción	CO ₂
Heterótrofos		
Quimioheterótrofos	Reacción orgánica de oxido - reducción	Carbono orgánico
Fotoheterótrofos	Luz	Carbono orgánico

Tomado de: Tchobanoglus, et al., 1994.

Para este caso y para todos los procesos biológicos cuya finalidad es la conversión de la materia orgánica en un producto final estable, los microorganismos que son de mayor interés serán aquellos que se clasifiquen como quimioheterótrofos, de acuerdo con su metabolismo. Para el caso concreto de la digestión anaerobia los microorganismos llevan un metabolismo fermentativo ya que estos no requieren de un donante de electrones externo. Existe también un grupo de bacterias metanogénicas quimioautótrofas, que reducen el CO_2 con H_2 como fuente de electrones.

De este modo los microorganismos fermentativos pueden ser: a) anóxicos que son aquellos organismos capaces de utilizar compuestos inorgánicos oxidados como los nitratos y los sulfitos b) anaerobios obligados que son los microorganismos que son capaces de existir en ambientes libres de oxígeno y por último c) los microorganismos facultativos que son aquellos capaces de crecer ya sea en ausencia o presencia de oxígeno.

El metabolismo fermentativo, es un proceso termodinámicamente poco eficaz, lo que hace que los microorganismos estrictamente fermentativos se caractericen por tener tasas de crecimiento y de producción celular muy bajas.

Los microorganismos generalmente se clasifican según su estructura y función celular. Con relación a lo primero se pueden encontrar microorganismos eucariontes o procariontes.

Organismos Eucariontes que son aquellos que presentan un núcleo verdadero rodeado de membranas, la mayoría son multicelulares con diferenciación de tejidos como por ejemplo las plantas y animales; pero también los hay unicelulares

con poca o ninguna diferenciación de tejidos como por ejemplo los protistas (como son las algas y protozoarios).

Organismos Procariontes; aquellos que carecen de núcleo, no presenta estructuras separas por membranas y su ADN se encuentra disperso.

Dentro de los procariontes se encuentra a los grupos conocidos como *Eubacterias* y a las *Archeobacterias*. Estas últimas son de gran importancia dentro de los procesos de conversión biológica anaerobia de la materia orgánica.

Las *Eubacterias* son aquellos microorganismos que no presentan un núcleo verdadero y cuya química celular es parecida a los eucariontes. En este grupo se encuentran ubicadas la mayoría de las bacterias.

Las *Archeobacterias* que no presentan núcleo verdadero y cuya química celular es diferente, a los otros grupos; aquí podemos encontrar a organismos como las bacterias Metanógenas, Halófilas y a las Termoácidofilas (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

Las archeobacterias comparten algunas características con las eubacterias, como la ausencia de un núcleo verdadero y de organelos, pero sus principales diferencias son:

- a) No contienen mureína en su pared celular, además de que su membrana citoplasmática está constituida por hidrocarburos isoprenoides, en lugar de ésteres de glicerina y ácidos grasos como el resto de las bacterias.

- b) Contienen enzimas específicas, como la coenzima M, que es un ácido que toma parte en la síntesis de metano como portadora de grupos metilo a través de una metil Co-M intermediaria.

- c) Se encuentran de forma natural en ambientes extremos predominan condiciones de ausencia total de oxígeno por lo que la metanogénesis ocurre en ecosistemas muy diversos como: pantanos, sedimentos marinos, ambientes extremos que incluyen manantiales hipertermofílicos así como el tracto digestivo de algunos animales, como el rumen de los rumiantes y de algunos insectos como las termitas.

3.3.3 Bioquímica y microbiología de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, mediante el cual la materia orgánica existente en el medio, se descompone por acción microbiana hasta metano y dióxido de carbono. Las bacterias actúan sobre la materia orgánica degradándola de modo que la energía que se libera en la reacción, en su mayor parte se encuentra en la molécula de metano y en una menor proporción se utiliza para satisfacer sus requerimientos vitales y de síntesis celular; como son el crecimiento y la reproducción.

Los procesos bioquímicos, que ocurren en la digestión anaerobia son llevados a cabo por las bacterias que se encuentran dentro de los reactores, mientras que los efluentes a tratar constituyen el sustrato para los microorganismos. Como todo proceso de tratamiento biológico, la digestión anaerobia se realiza por medio de diferentes microorganismos que son capaces de secretar enzimas específicas, lo que hace posible las diversas conversiones microbianas.

La producción de biogás es el resultado efectuado por diversos grupos bacterianos, mediante diferentes procesos de conversión que son:

- a) Etapa de hidrólisis (ruptura) y fermentación: Estos procesos son llevados a cabo por las bacterias hidrolíticas y fermentativas. Estas realizan primero la ruptura o la hidrólisis de grandes polímeros como los polisacáridos, proteínas, y lípidos así como la fermentación de los ácidos grasos.

En esta primera etapa, los compuestos como los polímeros naturales (por ejemplo la celulosa), las proteínas y otros compuestos de más bajo peso molecular (los aminoácidos, sacáridos y lípidos), son transformados por medio de la hidrólisis y la fermentación en ácidos carboxílicos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. A su vez, los azúcares y aminoácidos son utilizados por los organismos fermentadores para producir acetato, dióxido de carbono, hidrógeno y biomasa.

En esta etapa intervienen las bacterias formadoras de ácidos grasos volátiles; estas bacterias pueden ser anaerobias facultativas o estrictas de crecimiento rápido (con un tiempo mínimo de duplicación de 30 minutos). Fermentan la glucosa para producir dióxido de carbono, hidrógeno y una mezcla de ácido acético, propiónico y butírico.

Las bacterias anaerobias del género *Clostridium* constituyen una fracción importante de la población anaerobia responsable de la primera etapa, pero se han reportado otros grupos bacterianos como: Bacteroides, Bacilos, *Enterobacteriaceae*, *Pelubacter*, *Acetobacterium* e *Ilyobacter*.

Debido principalmente a la rapidez de reacción de las bacterias hidrolíticas y fermentativas de esta etapa, una sobrecarga orgánica puede producir una acumulación de ácidos grasos (AGV's) en el sistema.

Los productos que se originan del rompimiento durante la fase de hidrólisis forman los sustratos de las etapas intermedias del proceso de digestión anaerobia.

b) Etapa de acetogénesis (o producción de ácido acético): En este paso intervienen las bacterias productoras obligadas de hidrógeno (OHPA por sus siglas en inglés, *obligate hydrogen producing acetogen*). Durante esta fase, los productos de la fermentación son convertidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por las bacterias mencionadas. Estas realizan la oxidación anaerobia de los ácidos grasos de cadena larga y alcoholes, mediante un proceso conocido como β oxidación; así como la oxidación anaerobia de productos intermediarios como los ácidos grasos volátiles (AGV's) a excepción del acetato.

En los procesos de β oxidación, son separados dos carbonos de las moléculas de acetil - CoA, comenzando con el extremo carboxilo. La cadena se rompe entre los átomos de carbono α (2) y β (3), de aquí el nombre de β - oxidación. La unidad de dos carbonos formada es el acetil - CoA. Por lo tanto, si se tiene al palmitol - CoA ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{C}-\text{S}-\text{CoA}$) se forman ocho moléculas de acetil - CoA (Murray *et al.* 1998). A continuación se presenta un esquema de la β oxidación.

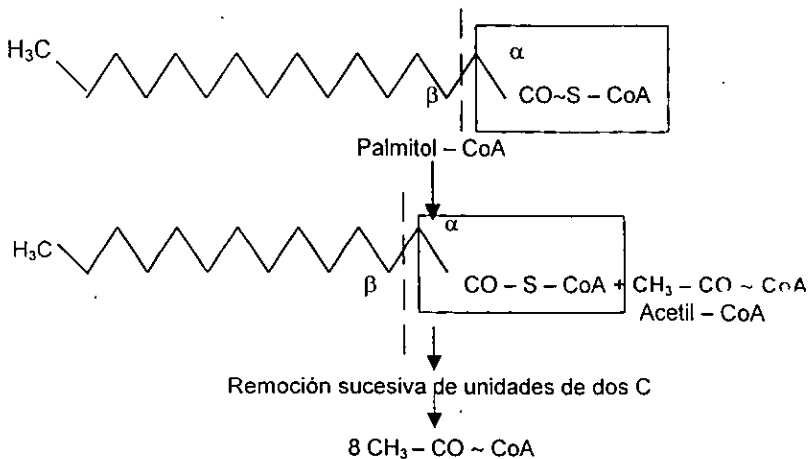


Figura 3.1 Esquema global de la β - oxidación de los ácidos grasos (Tomado de Murray *et al.* 1998)

- c) Etapa de metanogénesis. En esta etapa las bacterias metanógenas llevan a cabo la producción de metano por medio de la conversión de acetato (acetoclásticas) y de la reducción del dióxido de carbono con el hidrógeno (hidrogeofilicas).

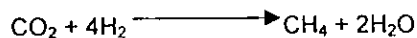
La conversión de acetato a metano es una reacción fermentativa de descarboxilación, y cuya ecuación es la siguiente:



La cual es llevada a cabo por las bacterias metanógenas acetoclásticas. Esta reacción tiene un importante efecto sobre el pH del medio, debido a la eliminación del ácido acético y a la producción del CO_2 , que al disolverse forma una solución amortiguadora de bicarbonato (HCO_3^-). Esta reacción contribuye con alrededor del 70% de la producción de metano. Las bacterias acetoclásticas frecuentemente encontradas en los digestores anaerobios pertenecen a los siguientes géneros:



Por otra parte, las bacterias encargadas de producir metano a partir del hidrógeno y del dióxido de carbono son las bacterias metanógenicas hidrogenofilicas. Éstas consumen el hidrógeno producido en la oxidación anaerobia para reducir el CO_2 que proviene de la etapa de fermentación de acuerdo a la ecuación siguiente:



Esta reacción tiene una doble función dentro del proceso de digestión anaerobia; por un lado, es la de producir metano y por el otro es la de eliminar el hidrógeno gaseoso. Al consumir el hidrógeno se posibilita y regula la producción de ácidos por las bacterias acidógenas (OPHA). Estas bacterias existen en relación sintrófica con las bacterias metanogénicas que utilizan hidrógeno, ya que estas son las encargadas de consumir el hidrógeno producido por las OHPA, manteniendo la presión parcial de dicho gas a los niveles requeridos (inferiores a 104 atm.). Mediante lo anterior, se tienen las condiciones termodinámicas necesarias para la conversión de los ácidos grasos a acético e hidrógeno. Esta relación de sintrofia, con base en el hidrógeno, se conoce como transferencia interespecie de hidrógeno, e implica un intercambio de H_2 entre un organismo quimioheterótrofo y una bacteria metanogénica, lo que permite realizar algunas reacciones químicas que pueden ocurrir solamente a bajas concentraciones de hidrógeno. Es muy importante señalar que las OHPA se inhiben cuando las presiones parciales de H_2 exceden de las 104 atmósferas razón por la cual establecen la relación sintrófica con las bacterias metanógenas hidrógenofilas; de cuyo buen funcionamiento depende en gran medida la operabilidad del digestor. (Moreno *et al.* 1993). Los géneros más representativos son:

Methanobrevibacter arboriphilicus

Methanospirillum hungatei

Methanobacterium formicicum

A continuación se presenta un esquema general de la digestión anaerobia con los principales géneros bacterianos que intervienen en el proceso.

La figura 3.2 Muestra el esquema general de la digestión anaerobia con los principales géneros microbianos involucrados.

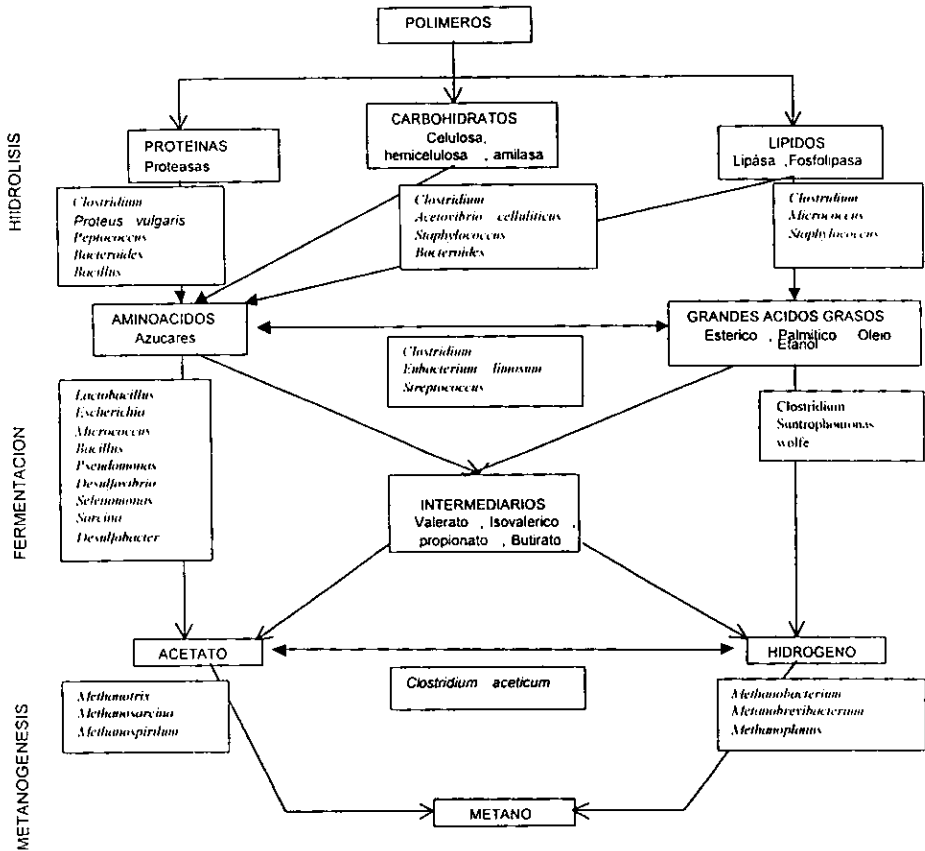


Figura.- 3.2 Diagrama general de la digestión anaerobia y géneros microbianos involucrados en el proceso (Tomado de Lester, 1987)

Varios tipos morfológicos de bacterias metanogénicas han sido aisladas en años recientes, y por medio de un profundo estudio de su fisiología así como de sus secuencias de RNA ribosomal se han clasificado en cuatro familias con doce géneros en total; la tabla 3.4 presenta algunos de los géneros encontrados en la producción de metano (Brock *et al.*, 1987)

Tabla 3.4. Características de algunas bacterias productoras de metano

Género y especie	Morfología	Sustratos	Características especiales
<i>Methanobacterium formicum</i>	Bacilo largo/filamentoso	H ₂ + CO ₂ , formato	No móvil
<i>bryantii</i>	Bacilo largo/filamentoso	H ₂ + CO ₂	Requiere vitamina B; no móvil.
<i>thermoautotrophicum</i>	Bacilo largo/filamentoso	H ₂ + CO ₂	Termófilo, no móvil
<i>Methanobrevibacter ruminantium</i>	Bacilos cortos, a menudo en cadena	H ₂ + CO ₂ , formato	Requiere acetato, varios aminoácidos, 2-metilbutarato y coenzima M No móvil
<i>smithii</i>	Bacilos cortos, a menudo en cadena	H ₂ + CO ₂ , formato	
<i>arboriphilus</i>	Bacilos cortos	H ₂ + CO ₂	Encontrado en madera húmeda de árboles vivos, no móvil.
<i>Methanomicrobium mobile</i>	Bacilos cortos, con flagelo polar	H ₂ + CO ₂ , formato	Alta movilidad; requiere líquido del rumen
<i>paynteri</i>	Bacilos	H ₂ + CO ₂	Marino, requiere NaCl
<i>Methanogenium cariaci</i>	Cocos pequeños irregulares	H ₂ + CO ₂ , formato	Marino, requiere NaCl, Acetato y extracto de levadura.
<i>marisnigri</i>	Cocos pequeños irregulares	H ₂ + CO ₂ , formato	Marino, requiere NaCl y tripticasa
<i>olentangyi</i>	Cocos pequeños irregulares	H ₂ + CO ₂	Requiere acetato
<i>thermophilicum</i>	Cocos pequeños irregulares	H ₂ + CO ₂ , formato	Marino, requiere NaCl, tripticasa y vitaminas, termófilo, crecimiento óptimo a 55°C

Tabla 3.4. Continuación

<i>Methanococcus vannielii</i>	Coco lobulado, irregular	H ₂ + CO ₂ , formato	Móvil, requiere selenio y tungsteno
<i>mazei</i>	Cocos, en racimos	Metanol, acetato, metilamina, H ₂ + CO ₂ (débil)	Pasa por ciclos de vida; requiere NaCl aún en cultivos puros
<i>Methanosarcina barkeri</i>	Cocos grandes en paquetes	H ₂ + CO ₂ , formato, metanol, acetato, metilaminas	Mucha versatilidad metabólica de todos los metanógenos; una cepa termofílica
<i>Methanotherix (Methanosaeta) soehngenii</i>	Filamentos, los cuales se fragmentan fácilmente en bacilos pequeños	Solamente acetato	Inútil para utilizar H ₂ + CO ₂ en la metanogénesis
<i>Methanothermus fervidus</i>	Bacilos	H ₂ + CO ₂	Crecimiento óptimo a 83°C, con intervalos de temperatura de 60 a 97°C requieren extractos de fermento

Tomado de: Brock et al. 1987.

Las bacterias encargadas de realizar la metanogénesis tienen en común la presencia de seis coenzimas únicas, especializadas en la metanogénesis.

- 1.- La coenzima M ó HS-CoM que sirve para la transportación del grupo metil bajo la forma metil-coenzima M (CH₃ - S - CoM).
- 2.- El factor F₄₂₀ es un 5-deazaflavin análogo en estructura al flavin mononucleótido (FMN). El F₄₂₀ es un transportador de electrones (dos) de bajo potencial del hidrógeno a los intermediarios de la biosíntesis del metano.
- 3.- La metanopterina es un transportador de moléculas monocarbonadas en las metanogénicas.

- 4.- El metanofuran que es la primera coenzima involucrada en la reducción del CO_2 en metano.
- 5.- El factor F_{430} contiene níquel y tiene una estructura tetrapirrólica. Se supone que tiene un papel en la reacción terminal de demetilación reductora del metil coenzima M para la producción de metano.
- 6.- El componente "B" o 7-mercaptoetaniltreonina fosfato (HS-HTP) que es el donador de electrones en la demetilación reductiva del metil coenzima M.

3.3.4 Factores ambientales

Todos los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia requieren de condiciones ambientales específicas para su crecimiento y actividad óptima, que en conjunto producen un incremento de la biomasa; así como altos porcentajes de remoción de la materia orgánica. Entre los parámetros ambientales más importantes que inciden en el proceso de digestión anaerobia se encuentran la temperatura, el pH y los nutrientes.

3.3.4.1 Temperatura: La temperatura a la que opera un reactor influye de manera importante en la actividad de la biomasa dado que las reacciones bioquímicas son directamente afectadas por este parámetro. Los microorganismos anaerobios se dividen de acuerdo con la temperatura en tres categorías (Tabla 3.5).

Psicrófilicos (cuya temperatura de desarrollo es inferior a 20°C) estas bacterias se pueden encontrar en procesos de operación de baja tasa como por ejemplo los tanques sépticos o los tanques Imhoff. Por las bajas temperaturas, los tiempos de retención de los lodos varían entre los 100 y 400 días.

Mesofílicos (se encuentran a temperaturas que van desde los 20 a 40°C), éste es el proceso más utilizado en las plantas de tratamiento anaerobias con un tiempo de retención de los lodos entre los 15 y 20 días.

Termofílicos (los cuales se pueden encontrar a temperaturas que van de los 45 a 65°C) este es un proceso más difícil de controlar por las elevadas temperaturas que se manejan, pero es considerablemente más rápido que los procesos de mesofilia. Se tienen tiempos de retención de 10 días.

Tabla 3.5.- Intervalos típicos de temperatura para diversos microorganismos

Condición	Temperatura °C	
	Óptimo	Intervalo
Psicofílicos	15	-10 a 20
Mesofílicos	35	20 a 40
Termofílicos	55	45 a 75

Tomado de: Techobanogius *et al.*, 1994

Como ya se mencionó los procesos termofílicos son poco utilizados por la dificultad que presenta el mantener las temperaturas elevadas a las que se lleva a cabo este proceso (50 a 60°C); así como la fragilidad de la población anaerobia que se puede desarrollar bajo estas condiciones. La temperatura óptima a la que se llevan a cabo los procesos anaerobios termofílicos es de 55°C lo que trae como resultado una mayor actividad de la biomasa.

Sin embargo, se presentan inconvenientes como la baja conversión celular o rendimiento másico, lo que trae como consecuencia que los arranques y las adaptaciones sean mucho más lentas a variaciones de cargas o a cambios de sustratos. Por otro lado, en termofilia la respuesta a cambios bruscos de temperatura puede verse reflejada en un paro temporal de la actividad, pero si los cambios de temperatura son graduales la actividad no se detiene totalmente. Estas características requieren de un cuidadoso control de la temperatura del proceso.

Las bacterias termofílicas pueden ser subdivididas dentro del grupo de los termotolerantes, cuya temperatura óptima de crecimiento se encuentra en el intervalo de 40 a 50°C en la que se encuentran predominantemente termofílicos facultativos. El grupo de los moderadamente termofílicos tiene su temperatura óptima de crecimiento entre los 50 y 65°C con una temperatura mínima de crecimiento de 45°C. Las bacterias extremadamente termofílicas o hipertermofílicas tienen un intervalo óptimo de temperatura de crecimiento mayor a 65°C. De estos diferentes grupos sólo los microorganismos termotolerantes y los moderadamente termofílicos pueden ser considerados para la aplicación en los procesos de digestión de lodos ya que es factible que se puedan mantener las temperaturas que necesitan estos microorganismos para su buen desarrollo, lo que hace posible su aplicación en la industria (Hamer *et al.*, 1985).

Las ventajas de la digestión anaerobia termofílica sobre la mesofílica son las siguientes:

- El tratamiento del lodo es realizado en un menor tiempo de retención, ya que se logra una reducción de la mitad, del orden de los 14 a 7 días. Esto es debido al rápido crecimiento de la bacterias metanogénicas acetoclásticas y otros organismos consumidores de ácidos grasos.
- Por otro lado, se obtiene una mayor destrucción de microorganismos patógenos, ya que se presentan condiciones similares a las de pasteurización.
- El lodo termofílico presenta una menor viscosidad lo cual facilita la operación; así como una mejora en la deshidratación del lodo.

La tabla 3.6 presenta una comparación general entre los dos intervalos de temperatura en la digestión anaerobia.

Tabla 3.6. Características del proceso de digestión anaerobia de acuerdo con el intervalo de temperatura en que se lleva a cabo la metanogénesis.

Mesofilia (20 a 40°C)	Termofilia (45 a 65°C)
Menos vapor de agua en el gas	Mayor actividad
Mayor diversidad de población metanógena	Menor TRH
Menos CO ₂ en el gas	Menos formación de lodos
Balance energético más favorable	Destrucción de microorganismos patógenos
Mayor experiencia en su aplicación	Mayor actividad metanogénica en la biomasa
	Equilibrio microbiano frágil

Tomado de: Moreno *et al.*, 1993

La digestión anaerobia termofílica a la fecha se ha aplicado a escala de laboratorio, escala piloto y en menor grado a gran escala, obteniéndose una alta remoción de sólidos volátiles (hasta 60 y 85%) con un alto grado de desinfección. En tales casos el proceso se ha operado con diferentes diseños como son:

- Digestión anaerobia termofílica convencional, seguida por un proceso anaerobio termofílico extendido (en varias etapas) con flujo continuo, mezclado completo y en cortos TRH (tiempo de retención hidráulica) (Krugel *et al.* 1998).
- Tratamiento en dos etapas utilizando una digestión anaerobia termofílica más una mesofílica (Oles *et al.* 1997)

Los parámetros de operación recomendados para dichos procesos, con la finalidad de obtener un inóculo adecuado, es utilizar lodo espesado con los suficientes nutrientes para facilitar la adaptación del inóculo mesofílico o termofílico, en la mayoría de los casos son mezclas de lodos primarios y secundarios, aunque a veces también se ha adicionado un porcentaje de estiércol en la mezcla.

Los intervalos para la temperatura van de 55 a 60°C, manteniendo un pH alrededor de 7.5, con un TRH de entre 10 y 21 días, logrando que en la segunda etapa (en los sistemas de dos etapas) este se reduzca a un TRH de entre 5.5 a 3 días. En reactores tanto de alta como de baja tasa, el intervalo de alcalinidad varía entre los 1500 y 3700 mg CaCO₃ /L.

La degradación de la materia orgánica que se encuentra presente en los lodos es llevada a cabo con una mayor rapidez, lográndose un porcentaje de reducción de la fracción volátil muy alto, de hasta un 80% (Krugel *et al.* 1998).

Por otro lado se consigue una mayor destrucción de microorganismos patógenos y parásitos, ya que se obtienen condiciones de pasteurización de los lodos, con temperaturas superiores a los 53°C con una reducción del 90% en huevos de *Ascaris*.

3.3.4.2 pH y alcalinidad: El pH ejerce una gran influencia sobre la actividad de los microorganismos. El pH óptimo para la actividad de los diferentes grupos involucrados en el proceso de digestión anaerobia, depende del grupo al que pertenecen; se sabe que el intervalo en el que todas las bacterias pueden interactuar es alrededor de la neutralidad (6.2 a 7.8) con una preferencia entre 7.0 y 7.2. Fuera de este óptimo la digestión puede continuar aunque en una forma ineficiente hasta un pH de 6.2 en donde las bacterias metanogénicas son severamente afectadas (Noyola, 1990).

La regulación del pH en un reactor anaerobio, se lleva a cabo mediante el sistema ácido – base, que es el resultado de las reacciones que ocurren dentro del proceso de degradación con la consecuente generación de alcalinidad.

La alcalinidad es la capacidad amortiguadora de un sistema para mantener un determinado pH mediante los sistemas ácido – base, carbónico, ortofosfórico y del amonio (NH_4^+). Cuando se tienen valores de pH de operación típicos en un reactor anaerobio, el sistema buffer que se encuentra presente es el formado principalmente por el bicarbonato y el ácido carbónico en solución.

Los digestores de lodos deben tener una concentración de alcalinidad por carbonatos de 2500 a 5000 mg/L para neutralizar los ácidos volátiles y de esta manera prevenir un descenso en el pH (Hernández, 1998).

3.3.4.3 Nutrientes: Como proceso biológico, la digestión anaerobia requiere de una fuente de carbono, así como de nutrientes inorgánicos esenciales para el buen desarrollo de las bacterias y la síntesis de nueva biomasa. Los nutrientes esenciales (también conocidos como macronutrientes) son el nitrógeno, el fósforo y el azufre, además de los micronutrientes como son el calcio, hierro y otros iones necesarios en el metabolismo bacteriano; estos nutrientes se requieren en concentraciones de mg/L. Además se requieren elementos traza como son: cobalto, níquel y molibdeno, entre otros que son considerados micronutrientes obligatorios y se requieren en concentraciones mínimas, del orden de 0.5 a 1.0 mg/L (Moreno *et al.*, 1993).

El níquel es esencial para las bacterias metanógenas debido a que es constituyente del citocromo de la coenzima F₄₃₀. El hierro en concentraciones que van de 0.3 a 0.9 mM es importante para la conversión del ácido acético a metano, mientras que el cobalto es importante para la formación de meticobalamina. También se ha reportado algunos otros micronutrientes como son el tungsteno y el selenio, aunque no son indispensables, para todas las metanógenas.

Algunos elementos juegan un papel doble, como por ejemplo el azufre cuya fuente son los sulfuros, ya que a bajas concentraciones estimula la actividad metanógena pero a concentraciones muy elevadas (100 a 150 mg/L, como H₂S disuelto) la inhibe.

3.5. Patógenos y parásitos presentes en los lodos residuales

Las aguas residuales municipales; así como los lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento pueden acarrear concentraciones considerables de agentes patógenos y parásitos relacionados con las excretas. Estos organismos pueden transmitirse por la ruta oral - fecal y tienen el potencial de causar infecciones importantes para la salud pública o producir brotes epidémicos asociados con las aguas residuales crudas o insuficientemente tratadas. Los principales microorganismos patógenos que se pueden encontrar en los lodos residuales pertenecen a los siguientes grupos: virus, bacterias, protozoarios y helmintos; estos organismos son capaces de sobrevivir a diferentes ambientes hostiles que presenten cambio de pH, temperatura, limitación de nutrientes, etc. Estos agentes patógenos, si bien provienen de las aguas residuales, alcanzan concentraciones más altas en los lodos por acumulación, ya que el volumen de los lodos es más pequeño que el volumen del agua a partir del cual fueron originados dichos lodos.

La eliminación de los microorganismos como los coliformes fecales no necesariamente indica la eliminación de otros tipos de microorganismos dañinos para la salud pública, como lo son los parásitos, representados por los huevos de helmintos. Esto se debe a que estos microorganismos presentan una mayor resistencia a ciertos tipos de desinfección, ya que se caracterizan por:

- Una gran resistencia a diversas condiciones en el ambiente.
- Presentan un periodo de latencia largo (más de seis meses).
- Presentan una resistencia a los desinfectantes comunes: Cloro, luz ultravioleta, ozono, etc.

Adicionalmente, estos organismos requieren de una dosis infectiva mínima, a la cual el ser humano no presenta ninguna inmunidad.

La tabla 3.7 incluye una lista de algunos de los microorganismos que se encuentran tanto en aguas como en lodos residuales, así como los síntomas o enfermedades entéricas con los que se asocian.

Tabla 3.7. Principales organismos patógenos y parásitos presentes en los lodos residuales.

MICROORGANISMO	ENFERMEDAD PRODUCIDA
BACTERIAS	
<i>Salmonella sp.</i>	Salmonelosis (alimento contaminado), fiebre tifoidea.
<i>Shigella sp.</i>	Disentería bacilar
<i>Yersinia sp.</i>	Gastroenteritis aguda (incluyendo diarrea y dolor abdominal)
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Escherichia jejuni</i>	Gastroenteritis
VIRUS	
Poliovirus	Poliomielitis
Coxsacovirus	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, etc.
Virus hepatitis A	Infección de hepatitis
Rotavirus	Gastroenteritis aguda con severa diarrea
Virus Norwalk	Gastroenteritis epidémica con severa diarrea
Retrovirus	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
PROTOZOARIOS	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enteritis aguda
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (incluyendo diarrea, calambres abdominales, pérdida de peso)
<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis
HELMINTOS	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Problemas digestivos y nutricionales, dolor abdominal, vómito, insomnio
<i>Ascaris suum</i>	Produce síntomas como: tos, dolor de pecho y fiebre, dolor abdominal, diarrea, anemia y pérdida de peso
<i>Trichuris trichiura</i>	Fiebre, dolor abdominal, dolor muscular, síntomas neurológicos
<i>Toxocara canis</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, trastornos digestivos
<i>Taenia solium</i>	Taeniasis
<i>Necator americanus</i>	Anquilostomiasis
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenolepiasis

(Tomado de Guzmán, 1994.)

3.5.1 Organismos indicadores de contaminación

Los microorganismos indicadores de contaminación fecal son aquellos cuya presencia evidencia que existe contaminación asociada con excretas humanas y de otros animales de sangre caliente. Estos son organismos que normalmente viven en el tracto intestinal de los hospederos y son considerados para evaluar la calidad microbiológica de las aguas residuales; incluyen principalmente a los coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales. Los primeros tienen poco significado sanitario debido a que algunos de sus miembros se encuentran distribuidos en la naturaleza, al igual que en el intestino humano y de otros animales de sangre caliente. Los coliformes fecales son más específicos, ya que permiten de una forma más confiable identificar a *Escherichia coli*, la bacteria indicadora de una reciente contaminación de tipo fecal; los principales representantes de este grupo son *Escherichia* y algunas cepas de *Klebsiella*.

Desde 1988 la OMS (Organización Mundial de la Salud) estableció que los indicadores bacteriológicos deben tener las siguientes características:

- Ser aplicable a todo tipo de aguas.
- Su tiempo de sobrevivencia debe ser mayor al de otros patógenos entéricos.
- No reproducirse en el ambiente.
- Su densidad debe relacionarse directamente con el grado de contaminación fecal.
- Deben poder determinarse cuantitativamente por los procedimientos rutinarios de laboratorio.

En general, estas características las cumplen los organismos llamados coliformes fecales.

◇ Coliformes fecales: El tracto intestinal humano contiene innumerables bacterias con forma de bastoncillos, conocidos como organismos coliformes. Cada ser humano puede evacuar de 100 000 a 400 000 millones de organismos coliformes cada día. Por tal motivo se considera que su presencia es indicador de una posible contaminación fecal.

Estos microorganismos son bacilos cortos, Gram – negativos, no esporulados, aerobios y anaerobios facultativos capaces de fermentar la lactosa con producción de ácido y gas en un periodo de 24 a 48 horas a una temperatura de 44.5°C. es decir, son organismos termotolerantes.

◇ Los coliformes totales: Son bacilos cortos Gram – negativos, no esporulados, aerobios y anaerobios facultativos capaces de fermentar la lactosa con una producción de ácido y gas en un periodo de 24 a 48 horas a 35°C.

Es conveniente tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Su ausencia no necesariamente es una evidencia de la potabilidad bacteriológica, ya que se pueden encontrar microorganismos como *Clostridium* y *Pseudomonas* aunque no se encuentren coliformes.
- Algunas cepas son capaces de reproducirse en aguas ricas en nutrientes, así como en sedimentos y en aguas poco contaminadas.
- Puede que algún otro tipo de microorganismo interfiera con las pruebas.
- Algunas cepas de *Escherichia coli* y *Klebsiella* son patógenas para el hombre.

3.5.2 Helmintos en México

En México, las helmintiasis intestinales representan un importante problema de salud pública. La infección intestinal por *Ascaris lumbricoides* varía entre un 43 y 94% en la población rural, de ahí la importancia de erradicar a este tipo de microorganismos, tanto de las aguas como de los lodos residuales que son utilizados para el riego en los campos de cultivo. Por ejemplo, los huevos de helmintos pueden sobrevivir sobre las hojas de las plantas o de las verduras, que se consumen crudas, por lo que es muy fácil contraer este tipo de parásitos.

En la tabla 3.8 Muestra el porcentaje de helmintiasis en la República Mexicana.

Tabla 3.8.- Porcentaje de helmintiasis en la república Mexicana.

Helmintiasis	Habitantes parasitados (%)
Ascariosis	33.3
Tricocefalosis	28.4
Enterobiosis	20.94
Uncinariosis	26.0
Himenolepiosis	15.87
Estrongiloidosis	4.30
Taeniosis	1.52

Tomado de: Tay *et al.* 1991

Como se puede notar, un gran porcentaje de la población se encuentra parasitada por algún helminto, siendo la población infantil la más afectada, ya que son ellos los que en mayor grado sufren este tipo de enfermedades (Tabla 3.9)

Tabla 3.9. Porcentaje de población infantil infectada por parásitos.

Helmintiasis	Lactantes (%)	Preescolares (%)	Escolares (%)
Ascariosis	19	42.7	41
Tricocefalosis	8.2	39.3	40.4
Uncinariosis	8.5	25.5	42.8
Estrongiloidosis	1.9	6.9	8.5

Tomado de: Tay *et al.*, 1991

3.5.3 Helmitos de importancia médica en México

A continuación se presenta una descripción de algunos helmintos de importancia médica y que con frecuencia afectan al hombre. Se hará una breve descripción de su ciclo de vida, morfología; así como de su patogénesis.

3.5.3.1 Phylum Nemátoda

Los nemátodos son organismos tanto de vida libre, en aguas dulces, marinas y en formas terrestres, como parásitos tanto de vegetales como de animales entre los que se incluye al hombre.

El *phylum* Nemátoda contiene una serie de organismos vermiformes, la mayor parte con un cuerpo cilíndrico, aunque pueden presentar diversas formas como son la fusiforme y filiforme. Su tamaño puede variar de unas cuantas micras, como algunos parásitos de plantas, a varios metros en algunos parásitos de mamíferos (*Plascentonema gigantissima*, que parasita la placenta de las ballenas y llega a medir 8.4 m de largo)

La mayoría de los nemátodos son incoloros y transparentes aunque algunas de las formas parásitas pueden presentar coloraciones que van del blanco amarillentas hasta rojizas, colores que adquieren por la ingestión de diversas sustancias. La gran mayoría de estos organismos son dioicos, con un marcado dimorfismo sexual, ya que las hembras son comúnmente más grandes que los machos aunque se conocen algunas especies que son hermafroditas. El ciclo biológico de los nemátodos puede ser: a) directo con un solo hospedero en su ciclo de vida o b) indirecto, requieren de por lo menos un hospedero intermediario y el hospedero definitivo.

En general, los nemátodos presentan cuatro mudas durante su ciclo de vida, las primeras dos mudas ocurren dentro del huevo mientras que las siguientes dos ocurren en el hospedero definitivo.

Algunas de la especies de nemátodos que son capaces de parasitar al hombre y que se encuentran en México son: *Ancylostoma duodenale*, *Ascaris lumbricoides*, *Capillaria hepatica*, *Enterobius vermicularis*, *Gnathostoma spinigerum*, *Necator americanus*, *Rhabditis pellio*, *Strongyloides stercoralis*, *Trichinella spiralis*, *Trichuris trichiura*, de estos los géneros de mayor importancia médica son: *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Enterobius vermicularis*, *Necator americanus* y *Strongyloides stercoralis*

◇ ***Ascaris lumbricoides*** Este es un nemátodo cosmopolita, más abundante en zonas cálidas y húmedas. Es alargado, de forma cilíndrica, la cabeza se encuentra provista de tres labios bien diferenciados, uno de los cuales es amplio y se encuentra localizado en la porción dorsal media mientras que los restantes se encuentran localizados en la porción ventrolateral; los tres labios se encuentran finamente denticulados

Los machos miden de 15 a 31 cm de largo con 2 a 4 mm de diámetro con el extremo posterior curvado hacia la posición ventral. Las hembras miden de 20 a 35 cm, pero pueden llegar a medir hasta 49 cm de longitud, por 3 a 6 mm de diámetro; los ovarios son extensivos y el útero puede liberar más de 27 millones de huevos a lo largo de su vida que puede ser de hasta 24 meses.

Los huevos fertilizados son anchos y ovoides, con una cápsula gruesa y transparente constituida por una membrana vitelina interna relativamente impermeable de naturaleza lipóide, una capa media transparente y gruesa, y una capa externa mamelonada, albuminoide y generalmente teñida de un color café dorado, que adquiere en el intestino del hospedero a causa de los pigmentos biliares. La membrana vitelina es inerte y debido a su impermeabilidad evita sustancias tóxicas del medio ambiente que pueden lesionar al embrión. Los huevos no fertilizados miden aproximadamente 90 μm de longitud y suelen ser alargados, la capa mamelonada externa es escasa o puede no existir.

Los huevos que han sido fertilizados requieren un periodo de incubación antes de poder ser infectivos. Estos huevos presentan resistencia a diversos factores ambientales como son: la sequedad, las bajas temperaturas, putrefacción del medio y la acción de algunas sustancias químicas fuertes. Un hábitat húmedo y sombreado, con temperatura de 22 a 30°C, favorece el rápido desarrollo del embrión hasta el de larva móvil de primer estadio.

- Ciclo de vida: Los huevos no eclosionan en el suelo ni pueden penetrar en el organismo por vía cutánea. El modo de infección es el que sucede vía oral por medio de huevos que contengan larvas infectivas; de tal modo que al deglutirse huevos infectivos, las larvas eclosionan en el estómago y la porción superior del intestino delgado, sobre todo en esta última.

Las larvas que logran eclosionar emigran activamente a la pared intestinal, después pasan a la circulación portal, al hígado, al corazón y por los vasos pulmonares, a los tejidos interalveolares de los pulmones. Al surgir las larvas de los huevos miden 260 μm de longitud por 14 μm de diámetro. Tras el crecimiento en los pulmones, que se completa al noveno día de la infección, éstas emigran por las vías respiratorias a la garganta, donde son deglutidas.

- El desarrollo total de *Ascaris lumbricoides*, desde la eclosión hasta que la larva se convierte en un organismo adulto en el intestino dura de 8 a 12 semanas. Una vez completado el ciclo de vida los organismos adultos pueden vivir hasta 20 meses, aunque generalmente viven un año.
- Epidemiología: El hombre se infecta con *Ascaris lumbricoides* al ingerir huevos que ya se encuentran embrionados procedentes de suelos contaminados o por la vía ano – mano – boca de personas que ya se encuentran infectadas. Es posible que al levantarse el polvo del suelo contaminado con huevos infectivos, estos puedan ser transportados por las corrientes de aire y así por medio de la vía nasal adquirir una infección por *Ascaris*.
- Los efectos patogénicos de la ascariosis se deben a las reacciones inmunológicas del hospedero, efectos mecánicos de los gusanos adultos; así como efectos de estos en la alimentación del hospedero.

Las alteraciones patológicas que se observan son: infiltración eosinofílica y formación de granulomas en los lugares de migración. Esta infección va acompañada de una desnutrición importante. Si existen condiciones de fiebre los gusanos migran hacia el exterior, pudiendo ocasionar oclusión intestinal, biliar o pancreatitis aguda, así como formar núcleos de cálculos si penetran en canales -

venosos hepáticos los gusanos pueden ser transportados a modo de émbolos al cerebro, corazón o a los pulmones (Lamothe, 1988).

A continuación se muestra el esquema del ciclo de vida del nemátodo *Ascaris lumbricoides*.

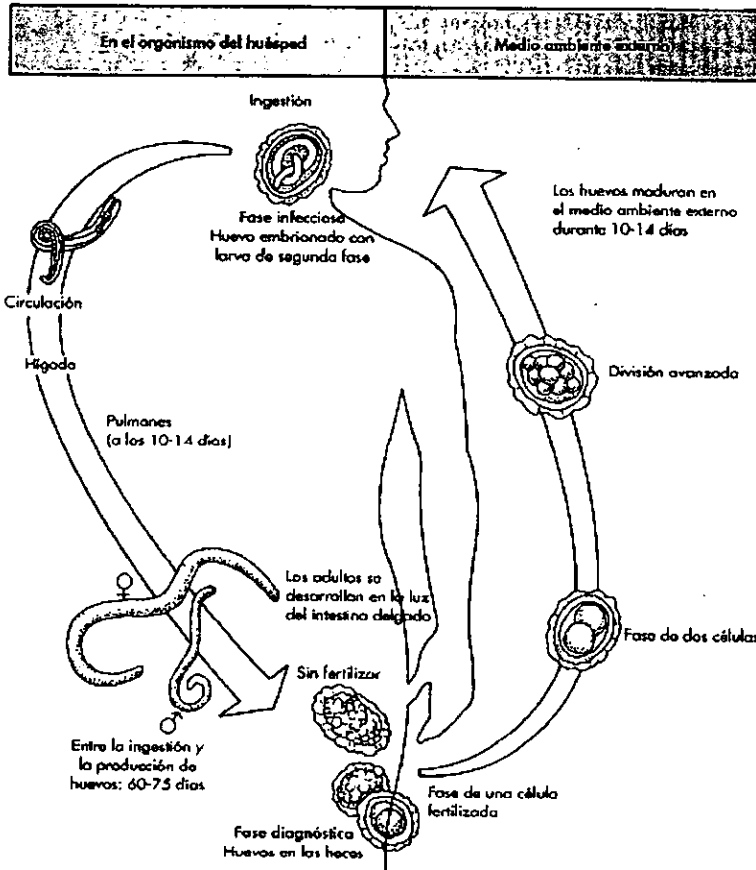


Figura 3.3 Ciclo de vida del nemátodo *Ascaris lumbricoides* (Tomado de Murray *et al.* 1997)

↳ *Trichuris trichiura*: Prevalece en las áreas tropicales y subtropicales. La tricocefalosis ocupa el segundo lugar en las enfermedades parasitarias gastrointestinales causadas por helmintos en la República Mexicana, después de la ascariosis. Este parásito vive de manera típica adherido a la pared del ciego del hombre y con menos frecuencia en el apéndice, colon o segmento terminal del ileon. El macho mide de 30 a 45 mm de longitud con el extremo caudal enrollado hasta 360°. La hembra mide de 35 a 50 mm de longitud y presenta como su extremo anterior.

Los huevos tienen forma característica de barril y además de la membrana vitelina poseen una cubierta triple; éstos llegan a medir de 50 a 54 µm por 22 a 23 µm. Se estima que la producción de huevos es de 1 000 a 7 000 huevos por día.

- Ciclo de vida: Los huevos de *Trichuris trichiura* necesitan permanecer en el suelo por lo menos de 10 a 14 días para que se desarrolle el embrión. El hombre se infecta al ingerir huevos embrionados, por lo que la larva eclosiona en el intestino delgado, aunque se establece en el intestino grueso. Una vez establecido el gusano es incapaz de desplazarse a otro lugar distinto, tarda tres meses en convertirse en adulto.
- Epidemiología: Las condiciones favorables para el desarrollo de los huevos embrionados de *Trichuris trichiura* evacuados en las heces son: encontrarse en un suelo húmedo y caliente, al resguardo de la luz directa. Para llegar a la fase infectiva han de transcurrir tres semanas como termino medio, tras las cuales el gusano activo se encuentra enrollado dentro de la cubierta en la primera fase larvaria. Al ingerirse estos huevos se adquiere la infección.

- Los huevos son resistentes a la desecación y al calor. Estos parásitos se adquieren por vía oral o por medio de infección ano – mano – boca.
- Patogénesis: El cuadro clínico producido por la tricocefalosis en el hospedero humano depende de la intensidad de la infección y de su duración así como de la edad. Este parásito es causante de anemia, así como diarrea y espasmos. La tricocefalosis se presenta por lo general en niños desnutridos de entre 2 y 5 años donde los síntomas son: crisis disintéricas repetidas y dolores abdominales, además de que se pueden presentar náuseas y vómito lo que contribuye a la deshidratación y anemia del enfermo.

Las medidas preventivas que se pueden implementar en las áreas endémicas son las siguientes:

- Tratamiento farmacológico de los pacientes infectados.
- Instalación y utilización de las letrinas en las zonas afectadas.
- Higiene personal y comunal.
- Ingestión de agua hervida, así como lavado riguroso de las frutas y verduras que se consumen crudas, especialmente en las zonas en las que las aguas negras se utilizan como abonos en los cultivos (Lamothe y Garcia, 1988).

A continuación se muestra el ciclo de vida del nemátodo *Trichuris trichiura*

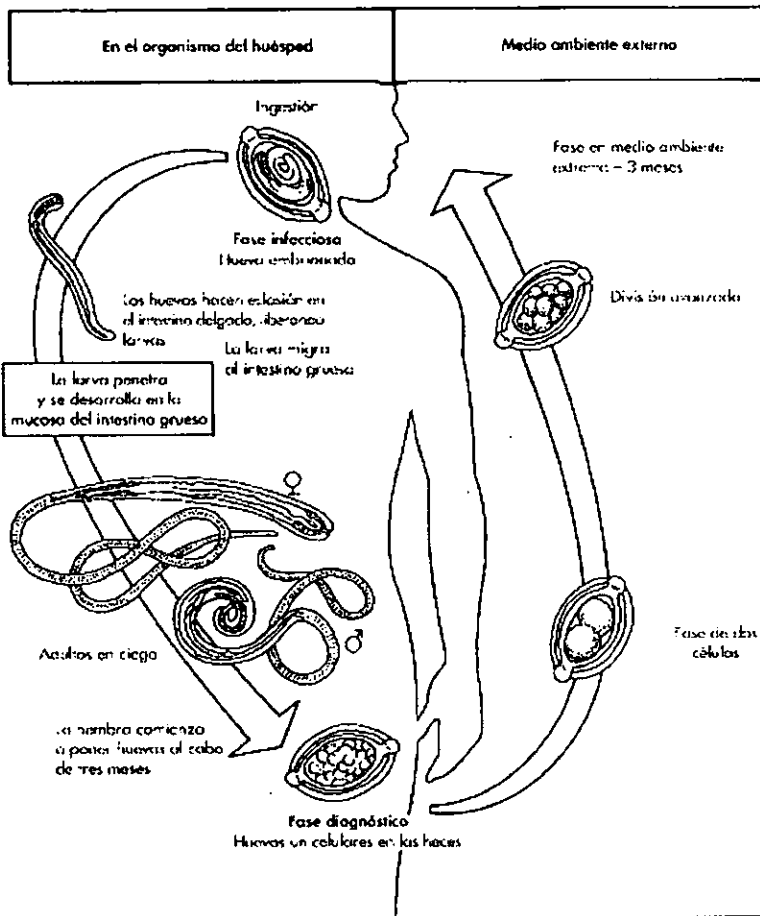


Figura 3.4 Ciclo de vida del nemátodo *Trichuris trichiura* (Tomado de Murray et al. 1997)

◇ ***Enterobius vermicularis***: Comúnmente conocidos como "oxiuros", de distribución cosmopolita común de climas templados y fríos afecta principalmente a niños de edad escolar. Los gusanos adultos de esta especie son blancos, fusiformes y están provistos de dos prominencias cuticulares laterales en la región cefálica, llamadas alas, presentan tres labios alrededor de la boca (que no es una cápsula bucal verdadera). Los machos son más pequeños que la hembras y miden de 2 a 5 mm de largo y de 0.1 a 0.2 mm de diámetro, su extremo caudal se encuentra curvado hacia la región ventral. Las hembras miden 8 a 13 mm de largo y de 0.3 a 0.5 mm de diámetro.

Los huevos son de forma oval elongada, son asimétricos ya que una de sus caras es plana y la otra abombada; miden de 50 a 60 μm de diámetro longitudinal y de 20 a 30 μm de diámetro transversal, la última capa que los envuelve es de constitución proteica (de albúmina), lo que facilita su adhesión a los pliegues anales donde son depositados por las hembras.

- Ciclo de vida: El ciclo se inicia con la copulación de los gusanos adultos, que se lleva a cabo en la región cecal del intestino grueso del hospedero donde generalmente se encuentran. Los huevos con una larva infectiva en su interior, entran al aparato digestivo del hombre (que es el único hospedero natural de esta especie) por medio de dos vías la oral y la nasal siendo más frecuente la primera. Los huevos eclosionan en el duodeno liberando una larva rhabditiforme que sufre dos mudas antes de instalarse en la región ileocecal del intestino, donde se fija a la mucosa y donde se desarrolla hasta adulto.

En el interior de los huevos, las larvas maduras resisten la aplicación de diversos desinfectantes así como la putrefacción pudiendo permanecer viables hasta 15 días en ambientes frescos y húmedos. Sin embargo no sobreviven a la deshidratación ni a la humedad excesiva.

- Epidemiología: La enterobiosis es una infección de grupo, siendo más frecuente en niños que en adultos. El mecanismo de infección más común es el directo por la vía ano - mano – boca de los individuos infectados o por la transportación aérea de los huevos embrionados.
- Patogénesis y sintomatología: La gran mayoría de las infecciones causadas por este parásito son asintomáticas aunque es común que se manifieste prurito anal por la salida de las hembras al depositar los huevos, lo que contribuye a la aparición de dermatitis en la zona, esto debido al intenso rascado. Además se puede presentar casos de nerviosismo, irritabilidad, pérdida de apetito, pesadillas, insomnio, pérdida de peso, calambres abdominales y diarrea.

Los gusanos adultos pueden causar lesiones en la mucosa intestinal, lo que puede ocasionar ligeras escoriaciones susceptibles a algún ataque bacteriano, que en una infección masiva, pueden transformarse en úlceras en las que el tejido del colon, íleon o recto se gangrena.

La higiene personal es una de las actividades preventivas contra la enterobiosis y deberá incluir aspectos como baño diario, aseo de las manos y cortes frecuentes de las uñas.

El convivir con una persona infectada facilita la transmisión del parásito a los demás miembros de la familia, ya que los huevos no sólo se localizan en la ropa y sábanas del paciente; si no que son llevadas por éste y por el aire a los objetos y las habitaciones que entonces quedan contaminados.

Para prevenir el contagio; así como las posibles reinfecciones es recomendable que el enfermo duerma vestido y que la ropa con la que tenga contacto sea lavada por separado con agua caliente exponiéndola al sol por largos periodos, ya que se ha encontrado que éste es letal para los huevos en ambientes con poca humedad (Lamothe, 1988). A continuación se presenta un esquema del ciclo de vida del nemátodo *Enterobius vermicularis*.

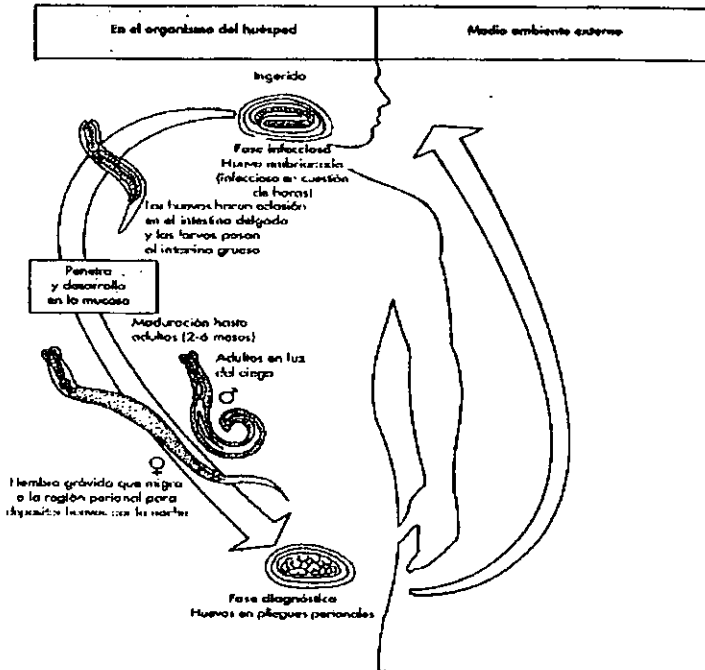


Figura 3.5. Ciclo de vida del nemátodo *Enterobius vermicularis* (Tomado de Murray et al. 1997).

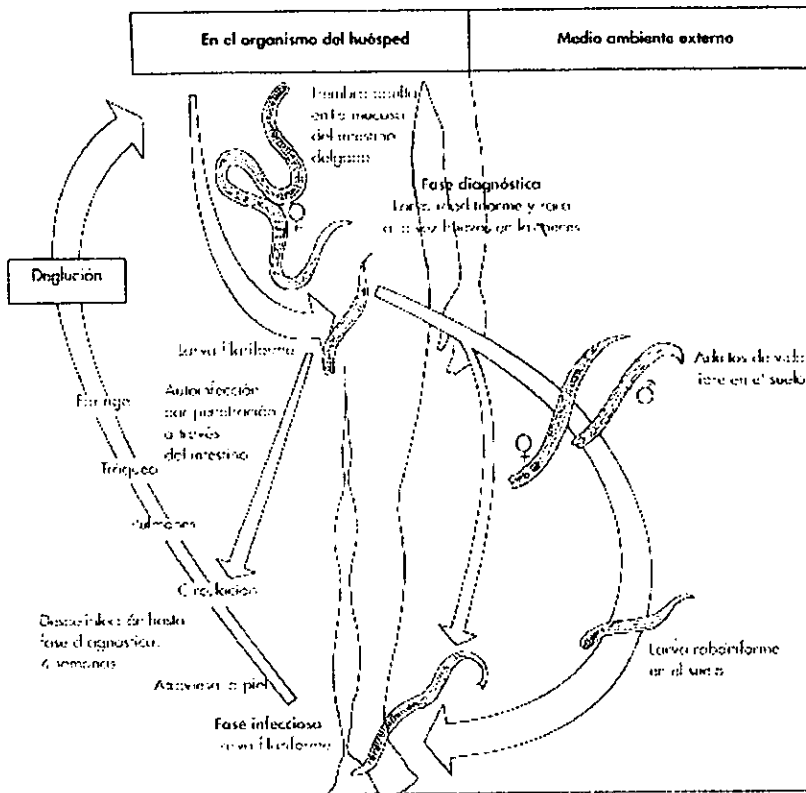
◇ ***Strongiloides stercoralis***: Este nemátodo es el productor de la enfermedad conocida como estrongiloidosis en el hombre, quien es el principal hospedero, aunque también puede encontrarse afectando a varias especies de primates; así como a perros, gatos y a otros mamíferos. Su distribución es prácticamente cosmopolita; como parásito se le encuentra principalmente en las zonas tropicales aunque su distribución se extiende también a varios continentes. Estos organismos tienden a comportarse como parásitos facultativos, ya que se pueden encontrar en vida libre, pero si las condiciones del medio cambian o varían un poco es entonces cuando se comportan como parásitos. Al parecer la generación que se vuelve parasitaria sólo está conformada de hembras partenogénicas, ya que hasta ahora no se ha detectado presencia o evidencia alguna de la presencia de los machos de la especie. Cabe aclarar que en los organismos de vida libre pueden encontrarse organismos de ambos sexos. Estos se encuentran parasitando la mucosa y la submucosa del intestino delgado, principalmente del duodeno, pero si se presentan infecciones masivas pueden encontrarse invadiendo todo el intestino delgado y grueso logrando alcanzar eventualmente los conductos pancreáticos así como los biliares.

- Ciclo de vida: *Strongiloides stercoralis*, como se mencionó, es un parásito facultativo, ya que se puede encontrar en una parte de su ciclo de vida como un organismo de vida libre en el suelo o bien como parásito. Como organismo de vida libre se alimenta de partículas orgánicas, sufriendo hasta tres mudas, antes de convertirse en adulto, reiniciándose el ciclo con varias generaciones en el suelo. Si las condiciones del medio cambian y se vuelven desfavorables, las larvas rhabditoides se transforman en larvas filariformes, es decir; que pueden ser infectantes para el hombre.

- Estas, al tener contacto con la piel del hombre la penetran por los pequeños vasos sanguíneos cutáneos y por medio de la circulación venosa son transportados al ventrículo derecho, de donde pasan a los pulmones atraviesan la membrana alveolocapilar alcanzando los alvéolos pulmonares de donde emigran a través del árbol respiratorio hasta la faringe donde al ser deglutidos pasan al intestino; una vez en el intestino sufren dos mudas antes de convertirse en adultos.
- Patogenia: El diagnostico de *Strongiloides stercoralis* no es seguro, ya que la infección no produce síntomas característicos, pero en general los cuadros clínicos que presentan son prurito seguido de una pequeña pápula y un edema. Cuando las larvas pasan por los pulmones, ocasionan la destrucción de los alvéolos pulmonares así como la infiltración celular por eosinófilos y pequeñas hemorragias intestinales que se manifiestan como dolores abdominales, epigástricos con carácter cólico y diarrea además de las náuseas y el vómito.

La forma de evitar esta parasitosis es por medio de la eliminación adecuada de las heces, por medio de la instalación de letrinas en las zonas endémicas; así como el uso de calzado cerrado y como en todas las parasitosis, es necesaria la higiene individual como colectiva (Lamothe y Garcia, 1988).

A continuación se presenta un esquema de ciclo de vida del nemátodo *Strongiloides stercoralis*.



La figura 3.6 Muestra el ciclo de vida del nemátodo *Strongiloides stercoralis* (Tomado de Murray *et al.* 1997)

◇ **Toxocara sp.:** La granulomatosis visceral, toxocarosis o síndrome de migración larvaria visceral (larva migratoria visceral) es producida en el hombre por larvas del género *Toxocara* (*T. canis* y *T. cati*); estos parásitos tienen como hospederos definitivos a perros y gatos respectivamente por lo que su distribución es cosmopolita.

La morfología de estas dos especies de parásitos es muy semejante, ya que ambas comparten una serie de características, como una boca provista de tres labios (dos en posición lateral y uno intermedio) cada uno de los cuales presenta un par de papilas sensoriales.

Las diferencias que se encuentran entre estas dos especies se basan en el diferente tamaño de los adultos, ya que los adultos de *Toxocara canis* son más grandes los machos llegan a medir entre 4 y 10 cm de largo y entre 2 y 2.5 mm de diámetro, mientras que los machos y hembras de *Toxocara cati* miden de 3 a 7 cm de largo y de 1 a 1.1 mm de diámetro. Los huevos en *Toxocara canis* son más grandes, miden de 85 a 95 μm de diámetro, en tanto que los de *Toxocara cati* miden de 65 a 70 μm .

- Ciclo de vida: Los gusanos adultos de estos dos parásitos viven en el intestino delgado de sus hospederos definitivos, que como se mencionó son perros y gatos respectivamente. Después de la fecundación, los huevos embrionados salen con las heces y 5 ó 6 días más tarde, las larvas sufren su primera muda para transformarse en larvas de segundo estadio, lo que ocurre aún dentro del huevo. Al ser ingeridos estos por un hospedero apropiado, eclosionan en el intestino donde son liberadas las larvas que viajan por la vía hepato – cardiopulmonar, ocurriendo una segunda muda en los pulmones, para de ahí dirigirse al intestino donde completan su desarrollo después de sufrir dos mudas más. El ciclo biológico de *Toxocara canis* sólo se lleva a cabo en los perros jóvenes, menores de seis meses de edad; en los perros adultos las larvas de segundo estadio no regresan al intestino, si no que pasan a la circulación general que las transporta a diferentes órganos, en los que viven durante largos periodos de tiempo.

- Esto tal vez se deba a que los perros adultos adquieren cierta inmunidad con infecciones previas. En las perras preñadas se lleva a cabo la infección prenatal, ya que las larvas del segundo estadio pueden atravesar la placenta y desarrollarse por completo en el cachorro, que al sexto día de nacido presenta larvas de cuarto estadio en su intestino.

La infección en el hombre ocurre cuando este ingiere alimentos contaminados con huevos embrionados, los huevos eclosionan en el intestino liberando las larvas en segundo estadio. En el hombre ocasionan respuestas inmunológicas, lo que impide que completen su migración normal por el cuerpo por lo que son encapsuladas, lo que ocasiona la formación de un granuloma eosinófilo en cualquiera de los órganos en que se encuentren, que puede ser hígado, pulmones, ojos y cerebro (Lamothe y García, 1988).

La patología producida en el hombre, por estos parásitos, varía de acuerdo con el órgano en que se encuentren; así como por el número de larvas que se encuentran involucradas en la infección. Sin embargo, los síntomas que se presentan con más frecuencia son: fiebre, tos, hepatomegalía, neumonía. En los propios órganos pueden ocasionar fibrosis, nódulos granulosos eosinofílicos, en cuyo interior se encuentran los parásitos.

Las medidas para prevenir esta parasitosis son difíciles de controlar ya que los hospederos definitivos se encuentran en todo el mundo, es recomendable que si se tiene gatos o perros en casa se les administre algún desparasitante de forma controlada. Sin embargo, como en las calles se pueden encontrar estos mamíferos, es imprescindible que se mantengan alejados a los niños, principalmente, o reducir el contacto que tengan estos con los perros y gatos.

3.5.3.2 Clase Céstoda

Los céstodos constituyen la clase más especializada de los platelmintos, casi todos sus representantes son endoparásitos. Su cuerpo es aplanado dorsoventralmente y se puede dividir de manera general en tres regiones: escólex, cuello y estróbilo. El escólex es el órgano con el que el parásito se adhiere a la mucosa intestinal de su hospedero definitivo, presenta varios tipos de estructura de fijación como pueden ser: ventosas, botrios, botridios, y probóscides pudiendo además ser inermes o encontrarse armados con coronas de ganchos. El cuello, que se encuentra situado inmediatamente después del escólex, es la zona no segmentada del parásito y produce por septación transversal de los proglótidos que conforman el estróbilo; éste se divide en proglótidos inmaduros en los que apenas se distinguen los macizos celulares que formarán los genitales masculinos y femeninos. Ya que la mayoría de éstos son hermafroditas, a continuación se encuentran los proglótidos maduros en los cuales los órganos reproductores se encuentran desarrollados. En la porción final del estróbilo se encuentran localizados los proglótidos grávidos que son los que contienen en su interior a los huevos con un embrión hexacanto.

Casi todos los céstodos pertenecen a la subclase Eucestoda y se conocen como "tenias"; esta incluye al orden *Cyclophyllidea*. Dentro de este orden se encuentran las familias: *Hymenolepididae* y *Taeniidae*. La primera incluye al género *Hymenolepis*, mientras que la familia *Taeniidae* presenta formas larvarias que son infectivas para el hombre como los son los cisticercos. Algunos géneros de importancia médica son: *Taenia solium*, *Taenia saginata*, *Hymenolepis nana*, *Hymenolepis diminuta*.

↳ **Taenia solium**: Este céstodo se conoce comúnmente como "solitaria" y es uno de los parásitos que tiene al hombre como su único hospedero definitivo de forma natural, y ocasiona la enfermedad conocida como teniasis. Su forma larvaria también puede infectar al hombre y a otros mamíferos, principalmente cerdos, en los que produce la cisticercosis. Este parásito puede llegar a medir de 2 a 7 m de longitud con un escólex cuadrado o redondeado de 1 mm que porta en el ápice una doble corona de ganchos, en número de 22 a 32 que miden entre 0.110 y 0.180 mm de largo

La ingestión de los huevos de taenia es debida al consumo de alimentos contaminados con materia fecal de una persona infectada, por el consumo de carne de cerdo infectada mal cocida o congelada, o por medio de la autoinfección por la vía ano – mano – boca. Las oncosferas resultantes pasan a la circulación y se instalan en el tejido subcutáneo, ojo, corazón, hígado, pulmones, encéfalo o músculo esquelético. La teniosis se manifiesta por irritación en la mucosa intestinal en el sitio de adhesión, se presenta pérdida de peso, indigestión y diarrea. La cisticercosis es una parasitosis producida por la larva de *Taenia solium* (*Cysticercus cellulosae*). Los cisticercos se pueden localizar en lugares donde pueden causar un gran daño como por ejemplo el cerebro, en donde pueden causar trastornos que van desde desequilibrio y parálisis hasta ceguera.

- Ciclo de vida: Este se inicia cuando los proglótidos grávidos se desprenden de la cadena y salen del intestino delgado del hombre con las heces, liberando los huevos en el medio; estos son dispersados fundamentalmente por el aire y agua, de ahí que su distribución sea muy amplia contaminando los alimentos.

Cuando son consumidos por un hospedero intermedio, los huevos eclosionan liberando una oncosfera (embrión provisto de tres pares de ganchos y una gran cantidad de glándulas de penetración); esta atraviesa la pared intestinal para dirigirse a los vasos mesentéricos y llegar por vía sanguínea a todo el cuerpo, alojándose principalmente, en músculos, cerebro, corazón, lengua y ojos en donde se transforma en cisticerco.

El único mecanismo por el que el hombre puede adquirir la teniosis es mediante el consumo de carne de cerdo, que contenga cisticercos, insuficientemente cocida; después de la ingestión, la larva se fijará en el intestino donde se desarrollará hasta alcanzar el estado adulto en el cual presenta un escólex armado (Lamothe, 1988). A continuación se presenta el esquema del ciclo de vida de *Tenia solium*.

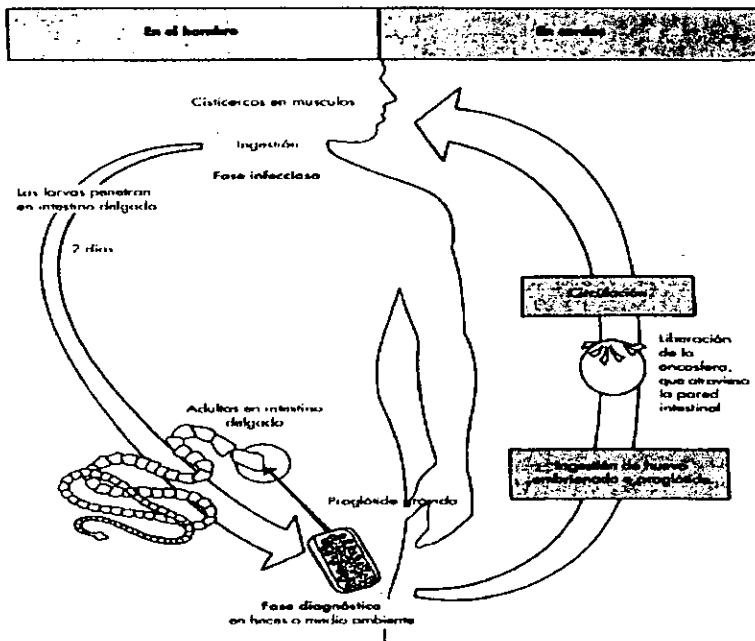


Figura 3.7 Ciclo de vida del cestodo *Taenia solium* (Tomado de Murray et al. 1997)

Algunas de la medidas preventivas contra la teniosis son: 1.- La cría de cerdos debe llevarse a cabo con el más estricto sentido de higiene, evitando que los animales tengan algún contacto con heces humanas que pudieran estar contaminadas.

2.- La inspección sanitaria que se le practica a la carne deberá hacerse con gran cuidado y en la parte del animal donde se considera que los cisticercos se pueden alojar en este hospedero, como son los músculos masticadores.

3.- Se debe evitar el consumo de carne cruda o mal cocida, por lo que esta deberá ser cortada en trozos pequeños y mantenida a una temperatura de 65°C, lo que puede ser suficiente para destruir a estos parásitos.

◇ ***Taenia saginata***: En este parásito el escólex presenta un rostelo carente de ganchos por lo que se le separó del género *Taenia*, puede alcanzar una longitud de hasta 22.5 m, aunque generalmente mide entre 5 y 10 m. Su distribución es cosmopolita, su presencia es más frecuente en los países musulmanes y Etiopía, donde es frecuente el consumo de carne de res cruda o poco cocida. La infección por este parásito generalmente es asintomática aunque puede producir diarrea, dolor abdominal, pérdida de peso, alteraciones en el apetito, además del prurito anal que es provocado por la salida espontánea de algunos proglótidos.

- Ciclo de vida: El desarrollo de *Taenia saginata* es similar al de los demás miembros de la familia Taeniidae, teniendo como único hospedero definitivo natural al hombre y como hospedero intermediario principal a las reses (*Bos taurus*), aunque su cisticercos ha sido encontrado en otros mamíferos como: búfalos, antílopes, jirafas, cabras y ciervos del viejo mundo.

- Se cree que el cisticerco de esta "tenia" (*Cystercus bovis*) no infecta al hombre aunque se han registrado algunas cisticercosis que se le pueden atribuir a esta forma larvaria.
- Epidemiología: El hombre puede adquirir la infección al ingerir carne de res cruda o mal cocida que contenga cisticercos viables. El ganado se infecta al pastar en sitios contaminados con heces fecales de personas parasitadas.
- Patogénesis: En ocasiones el parásito puede producir una obstrucción intestinal aguda, en otra los proglótidos pueden instalarse en la luz del apéndice lo que ocasiona el inicio de una apendicitis aguda. A menudo se puede presentar diarrea, así como dolor estomacal, por hambre, y pérdida de peso (Lamothe y García, 1988).

A continuación se muestra el esquema del ciclo de vida del céstodo *Taenia saginata*.

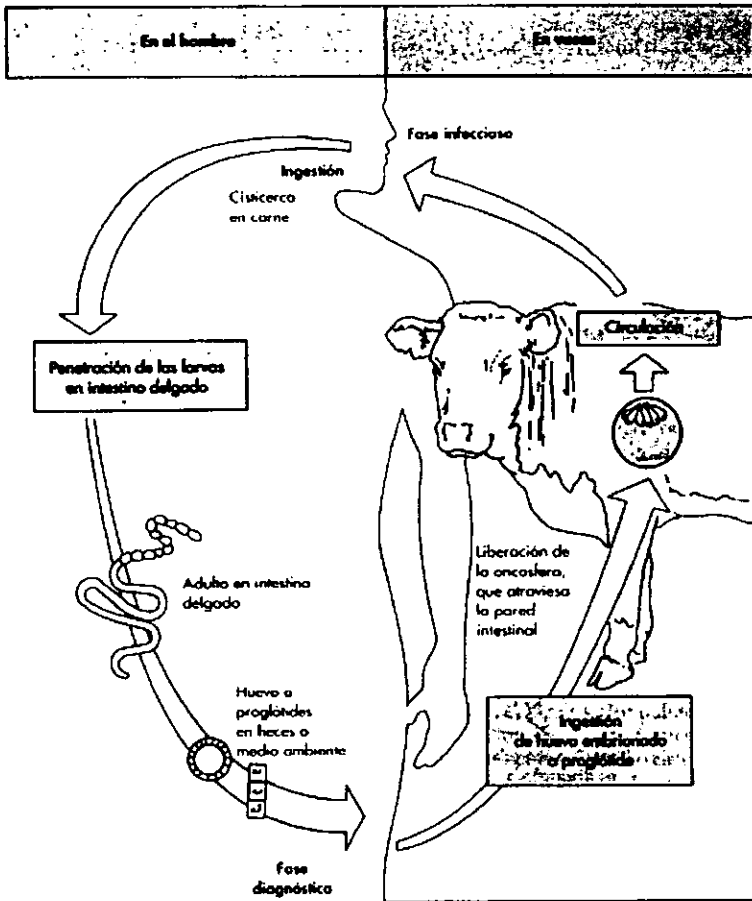


Figura 3.8 Ciclo de vida del cestodo *Taenia saginata* (Tomado de Murray *et al.* 1997)

Por la similitud que existe en la forma de infección de estos primeros dos cestodos, en el hombre la forma de evitar contraerla puede ser de la misma manera que para *Taenia solium*.

∨ *Hymenolepis nana*: Este gusano presenta un escólex pequeño en forma romboidal y se encuentra provisto de una serie de cuatro ventosas esféricas; así como de un rostelo protráctil armado con una corona de ganchos cuyo número oscila entre 20 y 30. El gusano completo puede medir hasta 40 mm de longitud por 1 mm de diámetro como máximo.

Los huevos casi esféricos, hialinos, llegan a medir de 30 a 47 μm de diámetro y contienen una oncósfera encerrada en una envoltura interna con dos engrosamientos polares de los cuales salen de 4 a 8 filamentos polares. Dentro de la oncósfera hay tres pares de ganchos en forma de lanceta

- Ciclo de vida: El ciclo biológico de este parásito presenta dos tipos de desarrollo: directo e indirecto. El primero es la forma de infección más común para el hombre y no interviene ningún hospedero intermediario, ya que se lleva a cabo por la ingestión directa de los huevos que son liberados en las heces fecales. Al ser ingeridos, eclosionan en el intestino delgado donde liberan las oncósferas que penetran en las vellosidades intestinales y se transforman en cisticercoides; posteriormente salen a la luz intestinal donde se adhieren a la mucosa para transformarse en adultos (Figura 9.3).

El desarrollo indirecto se presenta en otros hospederos definitivos como por ejemplo los roedores; aquí interviene un hospedero intermediario, que por lo general es la pulga del perro (*Ctenocephalides canis*) o la pulga del hombre (*Pulex irritans*); al ingerir los huevos de este céstodo, es liberada la oncósfera para completar su desarrollo a cisticerco.

- Epidemiología y Patogenésis: La sintomatología producida por este céstodo está relacionada con el número de parásitos que se encuentren adheridos a la mucosa intestinal que por lo general se encuentra irritada. La infección se adquiere por ingestión directa de los huevos de *Hymenolepis nana*, o por autoinfección por la vía ano – mano – boca, por lo que esta parasitosis es más frecuente en niños que en adultos. Los síntomas que se presentan son: reacciones alérgicas, dolor de cabeza, inanición, así como diarrea en forma periódica y dolor abdominal.

Como métodos para evitar contraer esta parasitosis se recomienda lavar muy bien los alimentos que se consumen crudos así como hervir el agua además de evitar en lo mayor posible el fecalismo al aire libre. Como existe una vía indirecta del ciclo de vida de este parásito es recomendable también que se reduzca el contacto con los animales domésticos, ya que no se puede descartar por completo la ingestión de pulgas parasitadas. Por lo anterior, juega un papel importante la aplicación periódica de algún insecticida para la eliminación de las pulgas en los animales domésticos así como una forma rápida de eliminar a los roedores como las ratas (Lamothe y García, 1988). A continuación se presenta el esquema del ciclo de vida del céstodo *Hymenolepis nana*.

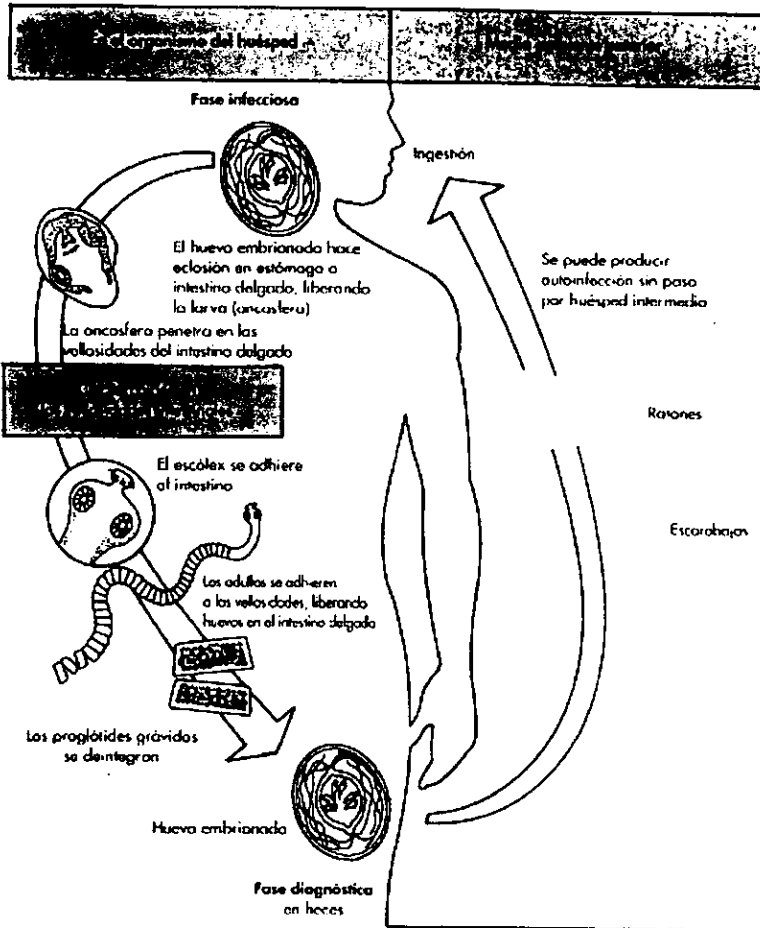


Figura 3.9 Ciclo de vida del céstodo *Hymenolepis nana* (Tomado de Murray *et al.* 1997)

◇ *Hymenolepis diminuta*: Este es un parásito común de la rata y del ratón, de distribución cosmopolita. Se puede diferenciar del anterior porque carece de rostelo armado y sus huevos no presentan filamentos polares, son casi esféricos y miden de 60 a 79 μm por 72 a 86 μm además de presentar una membrana interna alrededor de la oncósfera. Este céstodo ocasionalmente llega a infectar al hombre.

El gusano maduro mide de 20 a 60 mm de longitud con un aumento en el diámetro que va de 0.5 mm en la región cervical a 3.5 mm cerca del extremo caudal. Presenta un escólex pequeño con cuatro ventosas profundas en forma de copa y una cavidad apical dentro de la cual se evagina el rostelo.

- El ciclo biológico *Hymenolepis diminuta* es muy parecido al ciclo indirecto de *H. nana*, pero además de las pulgas del perro y del hombre, como hospederos intermediarios, utiliza a algunos artrópodos coprófagos o saprófagos; como son algunos escarabajos de las especies *Tenebrio molitor* (que ingiere los huevos en etapa larvaria) y *Trilobium castaneum*. Al desprenderse los proglótidos grávidos del estróbilo y con su desintegración, son liberados los huevos que son expulsados con las heces del hospedero. Estos son resistentes a la desecación, putrefacción y a algunos agentes químicos, sin embargo son muy sensibles a temperaturas mayores de 60°C. La ingestión del hospedero intermediario causa la infección del hospedero definitivo.

La sintomatología que se presenta en el hombre con esta parasitosis, es muy similar a la que se presenta por las infecciones de *Hymenolepis nana* aunque en este caso las infecciones masivas son poco frecuentes. La forma de prevenir una infección por este parásito en el hombre, se enfoca en la reducción de las grandes densidades poblacionales del hospedero definitivo de este céstodo, mediante campañas de desratizaciones.

Además, se debe evitar el contacto de los niños pequeños con animales que sean portadores de hospederos intermediarios, como pulgas, a los que se deberá atacar mediante la aplicación de algunos insecticidas (Lamothe y García, 1988).

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La parte experimental de este trabajo se realizó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para poder llevarlo a cabo, fue necesaria la construcción de cuatro digestores anaerobios y su posterior inoculación y arranque.

4.1 Descripción del dispositivo experimental

Los digestores anaerobios construidos para el tratamiento de los lodos fueron de forma oval, ya que este tipo de geometría tiene ventajas tanto operacionales como de mantenimiento, pues evita la formación de zonas muertas dentro del digestor. Los cuatro digestores fueron construidos en pasta de cerámica con un vidriado interno como revestimiento, cada uno con una capacidad de aproximadamente 7 L, pero con un volumen útil de 5 L. La parte superior de cada digestor se encuentra sellada con un tapón de hule con dos salidas, una de las cuales va hacia el sistema de medición de biogás, consistente de una probeta invertida llena de agua, la cual se encuentra sumergida en otro contenedor de agua, cuya función es la de un sello hidráulico. La segunda salida sirve para mantener la recirculación del lodo hacia la bomba peristáltica. La parte inferior de cada digestor presenta un juego de piezas de PVC, que se encuentra conectado a una manguera que recicla el lodo a través de una bomba peristáltica Masterflex. Cabe hacer la aclaración de que la construcción de los digestores fue realizada en una etapa anterior a este trabajo.

Todo el dispositivo experimental se encuentra colocado en un cuarto que tiene una temperatura constante de $35^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}$.

Los digestores termofílicos además cuentan con un sistema de calefacción electrónico ajustable a posibles variaciones de temperatura y nivel del líquido de calentamiento (aceite mineral NF 55 de uso comercial). Además cuenta con un recirculador, que consiste en una bomba estándar sumergible de uso comercial. A este equipo lo integra un soporte y dos serpentines de cobre, por donde circula el lodo con el fin de elevar su temperatura.

Los dos digestores termofílicos se encuentran forrados por una cubierta aislante de papel, algodón y un recubrimiento de papel aluminio; las mangueras también se encuentran cubiertas con un tubo térmico de polietileno.

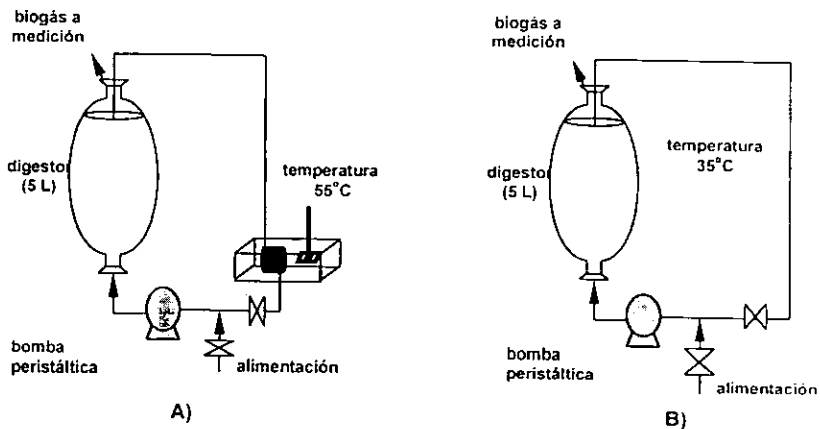


Figura 4.1 Esquema que muestra la configuración de los digestores; A) Termofílicos y B) Mesofílicos.

4.2 Condiciones de operación y análisis de los digestores

En el presente trabajo se realizó el seguimiento tanto de los parámetros fisicoquímicos como microbiológicos de cada uno de los digestores.

- **Temperatura.**- En el caso de los digestores termofílicos, se contó con un termómetro que permitió visualizar y controlar las variaciones de temperatura y mantenerla lo más cerca posible a los 55°C, ya que pequeñas variaciones en este intervalo afectan directamente la capacidad metabólica de los microorganismos; así como las constantes de equilibrio químico como por ejemplo la precipitación o redisolución de algunos compuestos orgánicos.

- **Producción y composición de biogás.**- La primera fue medida en la trampa de biogás que se encontraba en cada uno de los digestores por el desplazamiento del agua de la probeta (este era el primer parámetro medido en el día y se realizaba antes de llevar a cabo la purga de cada digestor). Para la composición se tomaba una muestra del biogás con una jeringa y por cromatografía de gases se determinaba la composición del biogás. El cromatógrafo (marca Fisher Gas Partitioner, modelo 1200) contaba con detector de conductividad térmica, con una temperatura en el inyector de 120 a 130°C mientras que en la columna se mantuvo a 50°C con fase móvil de helio a un flujo de 25 ml/min.; la cantidad de muestra inyectada fue de 0.5 ml.

- **pH.**- Este parámetro fue medido a partir de una muestra de 25 ml de lodo, por digestor; para esto se utilizó un potenciómetro marca Conductronic Pc – 18, con un electrodo de vidrio.

- Alcalinidad.- Representa la capacidad amortiguadora del sistema; se determinó tanto como alcalinidad total como de bicarbonatos, por medio de titulación con ácido sulfúrico 0.2 N.
- Relación alfa (α) o de alcalinidades.- Se obtiene mediante un método de titulación con ácido sulfúrico 0.2 N hasta un pH de 4.30, pasando por un pH de 5.75. La relación es el cociente entre el primer valor de la titulación (pH de 5.75) y el valor total obtenido a un pH de 4.30.
- AGV's.- La determinación de los ácidos grasos volátiles (AGV's), acético, propiónico y butírico se realizó al fijar las muestras con una gota de ácido clorhídrico (HCl) al 50%. Estas muestras fueron centrifugadas a 14,000 r.p.m. en una centrifuga Eppendorf modelo 5415 C. La concentración en que se encontraban estos ácidos fue determinada por cromatografía de gases, por medio de cromatógrafo modelo SRI 8610 con un detector de ionización de flama y columnas de sílice fundida superox FA (Alltech), utilizando el programa peak simple (SRI Instruments). El gas acarreador utilizado fue el nitrógeno. Las muestras fueron inyectadas en alícuotas de 0.15 microlitros con una microjeringa Hamilton (Dominguez, 1994).
- Sólidos suspendidos en sus tres formas.- La carga orgánica de alimentación, expresada como Kg SSV/m³d, debía ser mantenida constante en lo posible, considerando las variaciones de los diferentes lotes de lodo recibido. Para el cálculo de este parámetro se debían determinar los sólidos suspendidos totales, volátiles y fijos. Para ello se siguió la metodología analítica de los Métodos Estándar (APHA. AWWA.WPCF, 1992). Adicionalmente, con el fin de evaluar la eficacia de los sistemas para la degradación de la materia orgánica, se determinaron los sólidos suspendidos del lodo de purga.

Para conocer el estado general de los digestores se realizaron los parámetros físicos, químicos y biológicos descritos en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Parámetros y análisis que fueron evaluados en el presente estudio.

Parámetros	Análisis	Medición
Físicos	Temperatura pH Sólidos suspendidos	Constante Diaria Tres veces por semana
Químicos	Alcalinidad Relación de alcalinidades (α) Producción y composición de biogás AGV's	Diaria Diaria Diaria Tres veces por semana
Biológicos	Coliformes fecales Huevos de helminto	Al final Al final

- Coliformes fecales.- Se utilizó la técnica descrita en los métodos estándar según el método de número más probable (NMP) por medio directo A1 como se indica en la sección 9221 C (APHA, AWWA, WPCF, 1992). Para evaluar el funcionamiento de los digestores esta prueba se realizó al final de la corrida, con muestras del día durante un periodo de 15 días. El lodo para estas pruebas fue obtenido de la purga de los digestores, siendo necesarios aproximadamente 5 ml de lodo para cada prueba; a partir de esta cantidad de lodo se realizaron las diluciones necesarias.
- Huevos de helmintos.- Las pruebas de huevos de helmintos se realizaron con base en la técnica que se marca en el anexo de la Norma Oficial Mexicana (NOM – 001 – ECOL – 1996). Se tomaron muestras cada tercer día hasta completar el TRH que se tenía en ese momento. La cantidad de lodo empleada fue de 5 g (peso seco) por lo cual se realizó primero la determinación de los sólidos totales (ST) para calcular los ml de lodo necesarios por cada muestra.

Dado que esta técnica fue desarrollada para su aplicación en aguas, se realizaron algunas modificaciones para utilizarla en muestras de lodo (Anexo 1).

- Para las pruebas de viabilidad fue necesario incubar las muestras a 26°C en aproximadamente 4 ml de ácido sulfúrico 0.1 N por cuatro semanas al término de las cuales se sacaron de incubación y se observaron al microscopio marca Leitz modelo laborlux S utilizando el objetivo de 10x y 100x (Jiménez *et al.* 1999).

Las condiciones de operación de los digestores fueron las siguientes: los digestores mesofílicos, que se mantuvieron a 35°C, fueron alimentados uno con lodo aerobio (M1) proveniente de la planta de tratamiento de "Cerro de la Estrella" y el otro (M2) se alimentó con lodo del tratamiento primario avanzado (TPA) de la planta de San Pedro Atocpan. Los digestores termofílicos fueron alimentados con el mismo esquema, pero a una temperatura de 55°C (ver tabla 4.2)

Tabla 4.2 condiciones de operación de los digestores.

Digestor	Alimentación	Temperatura (°C)
M 1	Lodo biológico	35
M 2	Lodo TPA	35
T 1	Lodo biológico	55
T 2	Lodo TPA	55

- La alimentación se realizó de acuerdo con una carga orgánica volumétrica determinada (Bv), y que está en función de la tasa de velocidad de sustrato que ingresa al digestor con respecto al volumen del mismo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Bv = \frac{Q [SST]}{V}$$

Donde: Bv = Carga orgánica volumétrica (g SSV L⁻¹d⁻¹)

Q = Flujo de alimentación (L d⁻¹)

[SST] = Concentración de SST (g L⁻¹)

V = Volumen digestor (L)

Los digestores mesofílicos se alimentaron con 400 ml de lodo con el fin de proporcionar un TRH (tiempo de retención hidráulica) de 12.5 días. En los digestores termofílicos, las condiciones fueron 300 ml de lodo TRH de 16.6 días. Con el lodo purgado se hacían los análisis para cada uno de los parámetros que se siguieron durante la fase experimental. El procedimiento era primero purgar y después proceder a la alimentación. Al término de ésta se reiniciaba la recirculación con la ayuda de la bomba peristáltica. Las cargas orgánicas promedio con las que fueron operados los digestores fueron de 0.8 g SSV/L·d para el digestor M1, mientras que para el M2 fue de 0.9 g SSV/L·d en tanto que para los digestores termofílicos fue de 0.6 y 1.5 g SSV/L·d para T1 y T2 respectivamente.

4.3 Preparación de los lodos de alimentación

Al comenzar la fase experimental, el lodo biológico fue muestreado de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales localizada en Atlamaxac, Tlaxcala, que cuenta con un reactor anaerobio de flujo ascendente del cual se pueden realizar purgas a diferentes niveles; el lodo utilizado para la alimentación era obtenido del segundo nivel inferior, a 60 cm del fondo del reactor. Una vez que el lodo llegaba al laboratorio se preparó de la siguiente manera para su posterior uso en los digestores:

- 1.- El lodo fue transportado en lotes de 200 litros en recipientes de plástico; su contenido se homogenizó para ser cribado en tamices de 4 y 2 mm de malla.

2.- Una vez tamizado el lodo, este se dejaba sedimentar por más de seis horas, con el fin de retirar la mayor cantidad de sobrenadante posible. El lodo fue recuperado en recipientes más pequeños de aproximadamente 8 litros; esta operación se realizaba con todo el lote de 200 litros.

3.- Los lodos decantados fueron almacenados en un cuarto frío (a 4°C); de estos botes se tomaban 4 litros, para la alimentación diaria. Antes de ser usados se pasaban al cuarto caliente para acercarlos a la temperatura de los digestores.

Este lodo fue utilizado como sustrato de alimentación sólo durante el inicio de la experimentación posteriormente se cambió por lodo de tipo aerobio proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta del "Cerro de la Estrella". El lodo aerobio era tomado del sedimentador secundario y fue preparado igual que el sustrato proveniente de Tlaxcala, con la excepción de que era cribado en la misma planta de tratamiento. El lodo aerobio era cambiado cada quince días, de esta manera se tenía un lodo más fresco y sin tanto tiempo de almacenamiento. En este trabajo se presentan los resultados que se obtuvieron con este lodo aerobio ya que los resultados de la parte de arranque, cuyo sustrato de alimentación fue el de Tlaxcala se presentan en un trabajo previo que abarcó el arranque y la inoculación de los digestores (Rojas, 2001).

El lodo TPA (tratamiento primario avanzado) para la alimentación de los digestores M2 Y T2, fue traído de una planta de tratamientos de aguas residuales municipales que se encuentra en San Pedro Atocpan, D.F.

Al igual que el lodo biológico, este lodo se transportó en lotes de aproximadamente 80 litros, cada 15 días. Estos lodos fueron preparados de la misma forma que los lodos biológicos.

Cabe recordar que en la planta de tratamiento que produce este tipo de lodos se emplean floculantes y coagulantes químicos. En este caso el coagulante utilizado es el sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)$, mientras que el floculante es un polielectrolito aniónico. Este lodo presenta características especiales; bajo pH (< 5), alta concentración de aluminio y una rápida degradación de la materia orgánica, lo que hace que al poco tiempo de almacenados empiece a llevarse a cabo la fermentación de los mismos y por tal motivo se encuentre una alta concentración de ácidos orgánicos.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Parámetros fisicoquímicos

Para realizar el análisis de la operación de los digestores se deben conocer las características que presentaban los lodos al momento de ingresar en los digestores, en cuanto al pH, alcalinidad, relación alfa, sólidos suspendidos totales, volátiles y fijos; así como los coliformes totales y las cantidades de huevos de helmintos.

De estos datos se obtuvo que los lodos biológicos (Tabla 5.1) presentaron un pH promedio de 6.6, fluctuando entre los valores de 6.4 a 6.8. Una alcalinidad promedio de 870 mg CaCO₃/L y una fracción volátil de 71.2%. En lo que se refiere a los huevos de helmintos se encontró que se presentan en un promedio de 90 HH por muestra analizada.

Tabla 5.1 Datos de los lodos biológicos aerobios de alimentación de los digestores M1 y T1

	pH	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	Alfa	SST (gSST/L)	SSV (gSSV/L)	SSF (gSSF/L)	IVL (ml/gSST)	Vel.sedi. (m/h)	HH/gST
No. datos	81	81	81	39	39	39	2	2	7
Promedio	6.6	870	0.47	24	13.6	0.05	264.1	0.35	90.00
Desviación estándar	0.2	765	0.10	0.18	0.14	0.04	N.D	N.D	62.03

N.D: No determinado

En cuanto a la cantidad de ácidos grasos volátiles (AGV's) las concentraciones promedio que se encontraron en este lodo van desde 113 mg/L para el acético, mientras que para el propiónico y el butírico se encontraron en 72 y 41 mg/L respectivamente.

Para los coliformes fecales se trabajaron un total de 12 muestras y se obtuvo un promedio de 5.78×10^5 NMP/ g ST para el lodo biológico.

En el caso de los lodos TPA (tabla 5.2) el pH varía entre valores de 5.0 a 5.7 encontrándose en un promedio de 5.3; en comparación con los lodos biológicos la fracción volátil en los lodos TPA es un poco más elevada, del 73%. Por otro lado, la concentración de sólidos suspendidos es alta (46.59 g/L, 4.7%) La alcalinidad promedio de estos lodos fue de 905 mgCaCO₃ /L. Cabe mencionar que en esta tabla no se presentan los datos de alfa, ya que este lodo se encontraba demasiado acidificado (pH < 5.75). En cuanto a los huevos de helmintos, en este lodo se encontraron un promedio de 197 HH por muestra.

Tabla 5.2 Datos de los lodos fisicoquímicos de alimentación de los digestores M2 y T2

	pH	Alcalinidad (mgcaCO ₃ /L)	SST (gSST/L)	SSV (gSSV/L)	SSF (gSSF/L)	IVL (ml/gSST)	Vel. de sedi. (m/h)	HH/gST
No. datos	81	81	39	39	39	2	2	7
Promedio	5.3	905.0	46.5	33.6	0.06	269.2	0.27	197
Desviación estándar	0.2	321.8	13.28	9.66	0.03	N.D	N.D	152.2

N.D: No determinado

Para el lodo TPA las concentraciones promedio en que se encontraron los ácidos grasos volátiles van desde 881 mg/L para el ácido acético, mientras que para el propiónico y butírico las concentraciones fueron de 744 y 115 mg/L respectivamente. En cuanto a los patógenos se encontraron en un promedio de 5.68×10^4 NMP/g ST para las 12 muestras analizadas.

A continuación se presentan en forma gráfica los principales resultados obtenidos aproximadamente en 100 días de operación.

Se encontró que el digestor M1 presentó un pH estable de 7.16 sin presentar fluctuaciones. Sin embargo, la alcalinidad mostró variaciones en un rango que va desde 2080 hasta 3360 mgCaCO₃/L (Figura 5.1). La relación de alcalinidades promedio fue de 0.65 con un intervalo de 0.2 a 0.9.

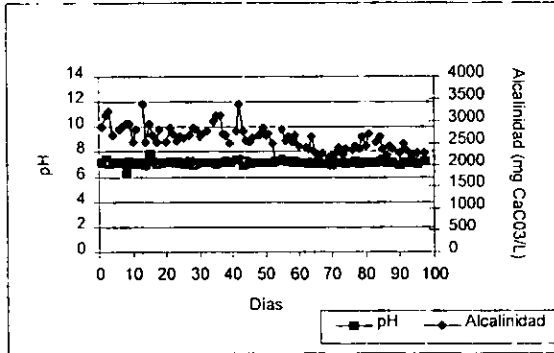


Figura 5.1 Evolución del pH y de la alcalinidad en el digestor M1

La producción de biogás no fue un parámetro confiable, ya que como se observa en la figura 5.2, este valor puede ser muy bajo (aproximadamente 10 mL por día) o muy alto, de hasta 1000 mL mientras que los valores de la composición de CH₄ se encontraron alrededor del 65%. La variación y poca confiabilidad de esta parámetro se deben a fugas del biogás del sistema, las cuales no pudieron ser controladas.

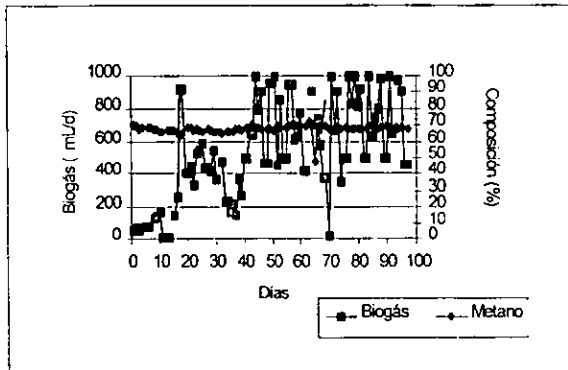


Figura 5.2 Composición y producción de biogás en el digestor M1

La carga orgánica (Bv) que ingresó a este y todos los digestores trató de mantenerse sin cambios significativos, con limitado éxito. Para el digester M1 se situó alrededor de 1.00 g SSV/Ld, aunque se presentaron fluctuaciones a lo largo del periodo experimental desde 0.6 hasta 1.2 g SSV/Ld. En la figura 5.3 se puede observar que las cargas de salida se encuentran tanto por debajo como por encima de las cargas de entrada, lo que indica que en ocasiones la mineralización de la materia orgánica no se llevó a cabo de manera satisfactoria, sin descartar la influencia de errores analíticos o de muestreo.

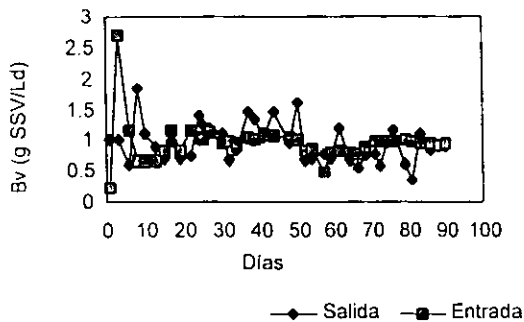


Figura 5.3 Cargas orgánicas de entrada y salida en el digester M1

En cuanto al digester M2, el pH se encontró en 7.06, los valores de la alcalinidad se encontraron en un promedio de 4217 mgCaCO₃/L, con una variación importante que se redujo durante la operación (figura 5.4). La relación de alcalinidades fue francamente baja, de 0.28 dentro de un intervalo de 0.2 a 0.42.

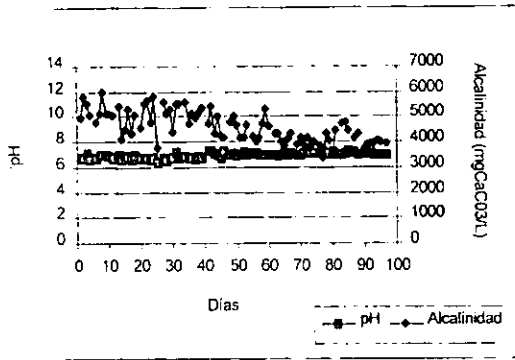


Figura 5.4 Evolución del pH y de la alcalinidad en el digester M2

En cuanto a la producción y composición de biogás, en este digester se tuvieron más problemas que en el anterior. Su producción fue muy variable presentándose días en los que no se registraba producción, en parte por las fugas no controladas. La composición presentó mayor variabilidad, debido a que este digester operaba con un nivel de ácidos grasos volátiles altos como lo sugiere el bajo valor de relación de alcalinidades.

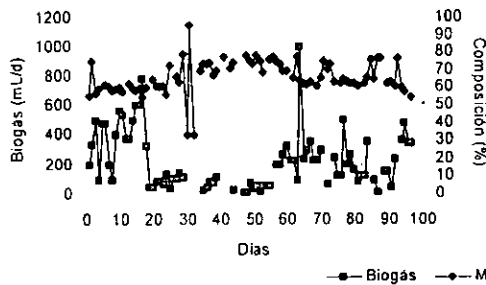


Figura 5.5 Composición y producción de biogás en el digester M2

Para las cargas orgánicas en este digester los valores de este parámetro variaron desde 0.2 hasta 1.8 g SSV/Ld. Debido a la acidificación del sistema, en la segunda mitad del periodo de operación se bajó la carga y se mantuvo alrededor de 1 g SSV/Ld.

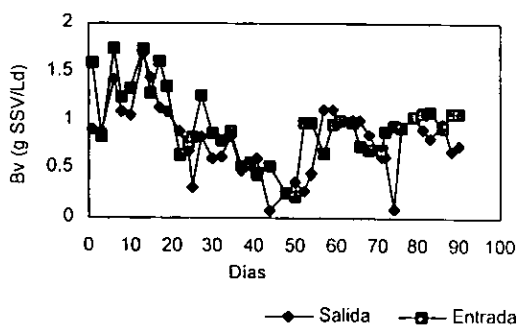


Figura 5.6 Cargas orgánicas de entrada y salida en el digestor M2

El digestor termofílico T1, tuvo un pH promedio relativamente alto, de 7.47 con ligeras variaciones entre 7.1 y 7.8. La alcalinidad se encontró en un valor promedio de 3592 mgCaCO₃/L, aunque esta última presentó un intervalo de variación muy grande que iba de 2600 hasta los 4700 mgCaCO₃/L. La relación de alcalinidades fue de 0.47 con un intervalo de 0.32 a 0.52.

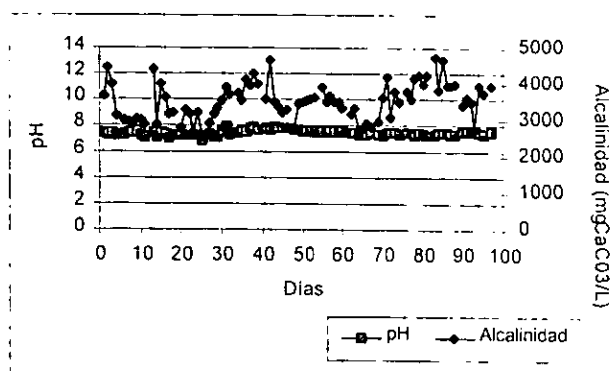


Figura 5.7 Evolución del pH y la alcalinidad en el digestor T1

La producción de biogás no fue constante, aunque aumentó de manera gradual. En cuanto a la composición, se encontraron etapas en las que la fracción de metano era constante, llegando a superar proporciones del 60%. En este digestor también se tuvieron problemas para captar el biogás generado y ocasionalmente no se pudo registrar su producción.

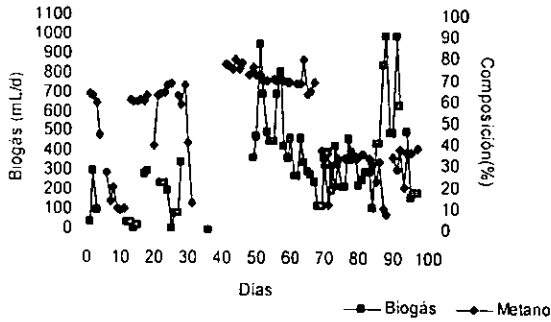


Figura 5.8 Composición y producción de biogás en el digestor T1

En el digestor T1 las cargas orgánicas de alimentación fueron más estables encontrándose en un intervalo de 0.5 a 1.00 g SSV/Ld.

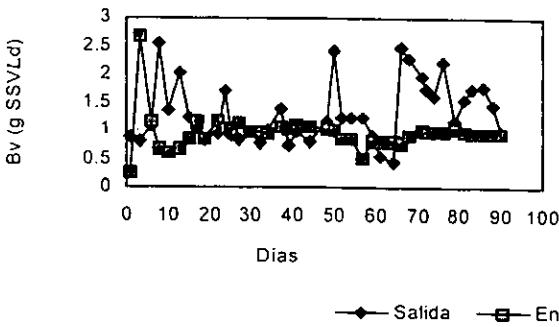


Figura 5.9 Cargas orgánicas de entrada y salida en el digestor T1

Como se ve en la figura 5.9, las cargas orgánicas de salida se encuentran por arriba de las de entrada, lo que indica que el sistema se encontraba probablemente saturado y que las bacterias no degradaban adecuadamente la materia orgánica que ingresaba al digester. De nuevo, errores de muestreo o analíticos no deben ser descartados en esas ocasiones.

En el digester T2 el pH se encontró en un valor promedio de 7.08 con un intervalo de variación de 6.70 hasta 7.60. Mientras que el valor promedio de la alcalinidad fue de 2145 mgCaCO₃/L, encontrándose un valor máximo de hasta 4080 mgCaCO₃/L. La relación de alcalinidades fue muy baja, de 0.28 con un intervalo de 0.22 a 0.60.

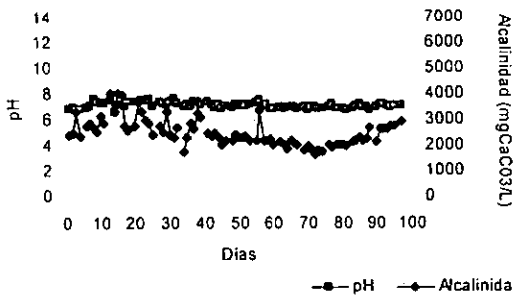


Figura 5.10 Evolución del pH y de la alcalinidad en el digester T2.

Con respecto a la producción y la composición del biogás en este digester, como se puede observar en la figura 5.11 los datos que se obtuvieron presentaron una gran variación ya que van desde cero hasta 1000 mL/d en la producción, mientras que la composición de metano se pudo observar que inicialmente estuvo por debajo del 50% y paulatinamente se elevó hasta valores entre 55 y 60%.

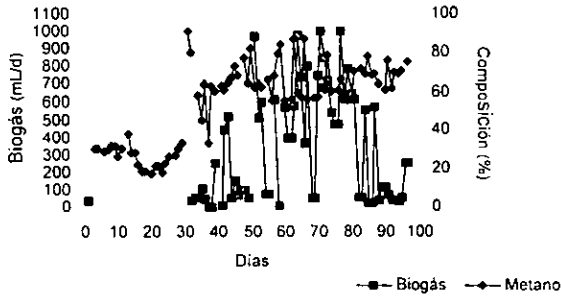


Figura 5.11 Composición y producción de biogás en el digester T2.

En este digester también se presentaron problemas de acumulación de AGV's, por lo que las cargas orgánicas alimentadas presentaron muchas variaciones encontrándose en un intervalo de 0.5 a 2.8 g SSV/Ld como se observa en la figura 5.12. A pesar de esto, se observa que las cargas orgánicas de salida se encuentran constantemente por debajo de las de entrada.

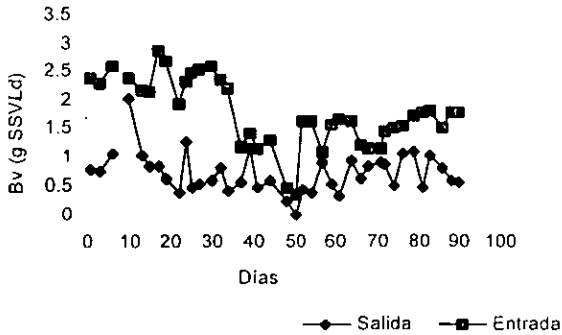


Figura 5.12 Cargas orgánicas de entrada y de salida en el digester T2

5.2 Biodigestores M1 y M2

Los resultados obtenidos muestran que en los digestores mesofílicos los valores de pH se mantuvieron cercanos a los que se encuentran reportados en la literatura para este tipo de procesos, entre 6.8 a 7.4, con un intervalo óptimo entre 7.0 y 7.2 (Noyola, 1990).

El digestor M1, mostró un aumento en los valores de alfa manteniéndose por arriba de 0.5 lo que indicó una buena capacidad amortiguadora y un digestor balanceado. En este caso la digestión anaerobia que se llevó a cabo en M1 mejoró en relación con el arranque del mismo, ya que los lodos aerobios, que sustituyeron a los lodos anaerobios parcialmente digeridos presentaron una mayor fracción volátil (71.26%) que puede ser mineralizada a metano y CO₂.

En cuanto a la actividad metanogénica en el digestor M1, se logró incrementar tanto la cantidad como la calidad del biogás lográndose producir hasta 600 mL/d con una composición de metano superior al 50% cuando se alimentaron cargas menores a 1.00 g SSV/Ld (Figura 5.3). Los ácidos grasos volátiles, para este digestor fueron encontrados en concentraciones que iban de 210.4 mg/L para el acético, siendo el que se encontró en mayor concentración, a 151.2 y 23.5 mg/L para el propiónico y butírico respectivamente.

El digestor M2 presentó un alfa de 0.3, valor inferior al de un digestor anaerobio en buen funcionamiento; este debe mantenerse por arriba a 0.5, un valor superior indica una operación estable (Noyola, 1998).

Esto fue debido a las características del lodo de alimentación, ya que el lodo TPA ingresó al digestor con un pH menor a 5, así como con una concentración de AGV's superior a 600 mg/L. Sin embargo, este digestor mantuvo un valor promedio de alcalinidad de 4210 mg CaCO₃/L, suficiente para mantener los valores de pH cercanos a la neutralidad (7.06).

Se encontró una acumulación de ácido propiónico (este se encontró en concentraciones de alrededor de 3500 hasta 4000 mg/L), por lo que tuvo que reducirse la carga de alimentación y no fue posible mantener los TRH deseados (el reportado en la literatura para el proceso de digestión anaerobia mesofílica es de 15 días). Los otros ácidos, acético y butírico se encontraron en concentraciones de 663.1 y 268 mg/L, respectivamente.

En cuanto a la actividad metanogénica en el digestor M2, no se observó un incremento de la producción de biogás en relación con la etapa de arranque, ya que en general en los digestores se presentaron diversos problemas de tipo mecánico, incluyendo fugas de biogás en el sistema. Esto originó que la producción del biogás no fuera cuantificable, aun cuando las muestras que se pasaron por el cromatografo indicaron que la composición de metano aumentó de menos del 40% a casi 65%.

Aunado a esto, como se pudo determinar en un análisis de metales practicado a los lodos de alimentación provenientes del proceso TPA, fue posible establecer las concentraciones de algunos metales pesados como el aluminio que se encontró en una concentración de 981.4 mg/L al ingresar al digestor, con una consecuente acumulación en el digestor M2 ya que se encontró en concentraciones de 2895.7 mg/L, en el lodo salida. A continuación se presenta la tabla 5.3 con los metales pesados que fueron analizados.

Metal	Entrada lodo TPA Concentración (mg/L)	Salida M2 Concentración (mg/L)	Salida T2 Concentración (mg/L)
Al	981.7	2895.7	683.6
Co	1.03	0.14	0.54
Cr	4.64	<0.009	0.24
Cu	13.3	16.4	18.9
Fe	524.6	239.8	330.7
Mo	0.81	0.46	0.52
Ni	1.7	0.68	0.94
Pb	6.08	2.22	3.03
Zn	134.6	30.58	93.0

Tabla 5.3 Concentraciones de metales pesados en el lodo de entrada TPA así como en los lodos de salida de los digestores M2 y T2.

Este efecto, asociado al pH mencionado, pudieron evitar que la digestión anaerobia en M2 alcanzara un grado de estabilización adecuado en el proceso ya que las cargas orgánicas de entradas eran iguales a las de salida (figura 5.6).

5.3 Biodigestores T1y T2

En el digestor T1, el valor alfa promedio fue de 0.5. En este digestor se tuvieron valores de pH entre 7.1 y 7.8 con un promedio de 7.4 mientras que la alcalinidad promedio fue de 3592 mg CaCO₃ /L y una producción de biogás de 422 ml/d con una composición de metano de 48%. Estos resultados mostraron que este digestor fue el que presentó un mejor funcionamiento y por lo tanto un mejor proceso de estabilización del lodo con un porcentaje de remoción de sólidos volátiles de 73.5% (Tabla 5.4). La concentración de AGV's para el digestor T1 fue de 355 mg/L para el ácido acético, mientras que para el propiónico y el butírico fue de 876 y 55 mg/L respectivamente (Ver anexo 3).

El digestor T2 presentó una capacidad amortiguadora, valores de alfa y de pH menores a los del digestor T1. Esto está relacionado con el todo de alimentación (TPA) que como ya se mencionó, presentó valores de pH menores a 5. Además las altas concentraciones de aluminio, el cual podría causar algún efecto negativo en el proceso de la digestión anaerobia (Jackson – Moss y Duncan, 1991; Sotirios *et al.* 1971) ya que en el lodo de salida este metal se encontró en concentraciones de 683.6 mg/L.

En este digestor las concentraciones de los AGV's fueron: para el ácido acético de 517 mg/L, mientras que el propiónico y el butírico se encontraron en 977 y de 83 mg/L respectivamente (Anexo 3). El ácido propiónico encontró en ocasiones hasta en 1500 mg/L, pero aunque los ácidos acético y butírico no se encontraron en concentraciones tan elevadas no fue posible aumentar las cargas de alimentación, ya que se presentaba el riesgo de acidificar todo el sistema, pues se mantuvieron valores de alfa de 0.38.

Por tal motivo no fue posible alcanzar los TRH normalmente alcanzados para el proceso de termofilia, que son de alrededor de 10 días, ya que en esta etapa experimental se tuvieron TRH mayores a los 17 días llegando hasta los 20 días.

Con respecto a la producción de biogás, en el digestor T2 se registró un aumento paulatino, aunque los datos presentaron una gran variabilidad de tal modo que había días en los que fue posible cuantificar la cantidad de biogás y días en los que no se presentó ninguna producción, en parte debido al problema de fugas ya mencionado. Por su parte la composición que se tuvo de metano fue poco a poco en aumento hasta alcanzar más del 50% de metano, con el resto de CO₂.

En esta etapa se observó en general que ambos digestores termofílicos mostraron un mejor funcionamiento, en comparación con la etapa de arranque reportado en un estudio previo (Noyola *et al.* 1998) ya que tanto la producción de biogás como la composición de este aumentaron de manera gradual.

Cabe mencionar que la digestión anaerobia termofílica fue más difícil de arrancar, ya que fueron necesarios más de seis meses para lograr que estos digestores tuvieran producción de biogás cuantificable (Krugel *et al.* 1998; Van Lier, 1996; Aiken y Mullennix, 1992).

5.4 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 mostraron un mejor funcionamiento que en la etapa experimental anterior a este trabajo (Noyola *et al.*, 1998) lo que se ve reflejado en una mejora tanto de la composición como de la producción de biogás, así como en una tendencia a aumentar la capacidad amortiguadora de los mismos para evitar cambios bruscos de pH en el sistema (Tabla 5.5)
- Los digestores M1 y T1, cuyo sustrato de alimentación era de lodo anaerobio, soportaron el cambio de sustrato (aerobio) de manera adecuada. Aunque mostraron algunas variaciones tanto de alfa, como de alcalinidad y una disminución de la producción de biogás en T1, se observó que ambos digestores tienden a una mayor estabilidad alcanzando en M1 un TRH de 15 días, que es el 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).

- El digestor M2 presentó problemas relacionados con la acumulación de los AGV's, específicamente de ácido propiónico encontrándose en ocasiones por arriba de los 3500 mg/L, así como fugas que se presentaron en diversas ocasiones en el digestor. Por este motivo se realizaron reducciones en las cargas de alimentación del digestor con el fin de ayudar a la estabilización del proceso y evitar su acidificación por una sobrecarga del sistema. En cuanto al resto de los digestores las concentraciones de AGV's se encontraron por debajo de los 1000 mg/L.
- El digestor T2, alimentado con lodo TPA, aumentó de manera constante su composición de metano encontrándose por arriba del 55% (Fig.5.11), aunque con muchas variaciones en su funcionamiento. Presentó una capacidad amortiguadora relativamente buena de 3000 mg CaCO_3/L , aunque la disminución del alfa llegó hasta 0.22. En general este digestor también tuvo un mejor funcionamiento, en relación a la etapa anterior a este trabajo, registrando una elevación tanto en la producción de biogás como de la composición de metano, lo que indicó que la actividad microbiana fue más eficiente que en la etapa de arranque. En cuanto a los AGV's, en este digestor se presentaron problemas de acumulación, donde el que se encontró en mayor concentración fue el ácido propiónico con valores de hasta 2000 mg/L, lo que corrobora el bajo valor de la relación de alcalinidades ya mencionada.

En la tabla 5.3 se observan los parámetros promedio de operación de los digestores. Se puede ver que los valores de biogás tanto de producción como de composición en los cuatro digestores se incrementaron de los 204 mL/d en el digestor M2 hasta los 694 mL/d en el digestor M1. Se puede mencionar que en la etapa de arranque, previa a este estudio, estos valores se encontraron por debajo de los 450 mL/d por lo menos para el digestor M1.

En el digestor T2 estos mismos parámetros pasaron de los 4.9 mL/d en el arranque, previo a este estudio, hasta los 477 mL/d en esta segunda etapa. En relación con la composición se tuvieron valores que van desde el 48% de metano en el digestor T1 hasta el 68% que presentaron los digestores M1 y M2; el digestor T2 presentó hasta un 66% de metano (CH₄). Estos valores pueden ser engañosos ya que hay que recordar que se presentaron fugas en los digestores.

Con respecto a los valores de alfa, en M1 y T1 aumentaron, en relación al trabajo anterior, de 0.54 y 0.35 a 0.71 y 0.49 respectivamente. Estos mismos valores para los digestores M2 y T2 disminuyeron pasando de valores de 0.4 a 0.33 en M2 y de 0.45 a 0.38 en T2.

Tabla 5.4 Parámetros promedio de operación de los digestores.

Digestor	No. Muestras	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Alfa	Bv entrada (gSSV/L*d)	Biogás (mL/d)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
M1	39	7.17	2432	0.71	0.8	694	68	32
M2	39	7.08	4217	0.33	0.9	204	68	35
T1	39	7.49	3592	0.49	0.6	422	48	52
T2	34	7.05	2145	0.38	1.5	474	66	34

Tanto en los digestores M1 como T1, el cambio de sustrato no resultó perjudicial para la actividad microbiana, aunque en el digestor termofílico T1 la adaptación a dicho sustrato se realizó de manera más lenta que en el digestor mesofílico. Por tal motivo, y aunque ambos digestores reciben el mismo lodo de alimentación, las cargas de entrada (Bv de entrada) son menores en T1. Hay que tomar en cuenta que durante todo el periodo de arranque este digestor no tenía producción de biogás por lo que tardo más en asimilar el nuevo sustrato de alimentación.

Puede considerarse que la mejora en la actividad metanogénica se debe a que el lodo aerobio presenta una mayor fracción volátil (71.2%) que se puede mineralizar a metano y dióxido de carbono, en comparación con el lodo anaerobio predigerido, proveniente de la planta de tratamiento de Tlaxcala. Este lodo presentó una menor fracción volátil (47.93%).

Los digestores alimentados con lodo TPA (M2 y T2) mostraron algunos problemas para mantener su pH y su alcalinidad, que al parecer fue debido a las características que presentaron los lodos de alimentación: bajos pH y altas concentraciones de AGV's y aluminio, que probablemente afectaron las condiciones metabólicas de la biomasa.

De acuerdo con la tabla 5.5, no fue posible alcanzar los TRH deseados, ya que se llegó a tener hasta 35 días en el digestor M2, mientras que en los digestores termofílicos se tuvo un TRH de 20 días. Los digestores M1 y M2 presentaron un porcentaje de eliminación de la fracción de SSV de 42.5 y 20.2% respectivamente con una producción de metano de 203 y 110 ml CH₄ TPN/g SSV elimi. para cada digestor.

La reducción de la fracción de sólidos volátiles (RSV) fue muy eficiente en los digestores M1, T1 y T2 donde los porcentajes de reducción son superiores al 57% lo que mostró una buena estabilización de la materia orgánica en estos tres digestores. Un lodo estabilizado presenta un porcentaje de reducción de la fracción volátil de entre el 40 y el 60% según Metcalf y Eddy (1991). Como se puede ver en el digestor T1, las Bv de entrada son menores que las de salida esto tal vez se deba a que el sistema no se encontraba debidamente estabilizado, además de probables problemas de muestreo.

Tabla 5.4 Condiciones promedio de operación de los digestores.

Parámetro	M1	M2	T1	T2
TRH	15	35	20	20
Bv entrada (g SSV/L*d)	0.8	0.9	0.6	1.5
Entrada (g SSV/L)	12	30	12	30
Entrada (g SSV/d)	4	4	3	8
Entrada SSV/SST (%)	74	72	74	72
Purga (g SSV/L)	7	24	18	11
Purga (g SSV/d)	2	4	5	3
Purga g SSV/SST (%)	32	64	43	52
% RSV	83.7	30.8	73.5	57.9
Bv salida (g SSV/L*d)	0.5	0.7	0.9	0.55
Bv eliminada (g SSV/L*d), (%)	0.3 (42.5)	0.2 (20.2)	N.D N.D	0.9 (63.3)
mL CH ₄ /d	472	140	203	315
mL CH ₄ TPN/d	321	95	138	214
mL CH ₄ TPN/g SSV alim.	80	22	46	28
mL CH ₄ TPN/g SSV elimi.	203	110	N.D	44

Donde % RSV = porcentaje de reducción de la fracción de sólidos volátiles según el cálculo de Metcalf y Eddy (1991).

N.D. No determinado, TPN temperatura y presión normal (0°C, 1atm.)

A continuación se presenta una tabla comparativa de algunos de los resultados obtenidos, tanto en la etapa de arranque (Noyola *et al.*1998) como en esta segunda etapa así como lo recomendado en la literatura para los procesos de mesofilia y termofilia respectivamente.

En esta tabla 5.6 se puede apreciar con respecto al arranque, que en la segunda etapa experimental la producción de metano aumentó de manera considerable de 0.08 mL CH₄ TPN/g SSV alim. hasta 45.9 mL CH₄ TPN/g SSV alim. para T1. Mientras que para M1 este parámetro también aumentó de 7.9 a 80.5 mL CH₄ TPN/g SSV alim.

Tabla 5.5 Comparación de algunos parámetros de operación de los digestores en la etapa de arranque previa a este estudio (Noyola *et al*, 1998) la segunda etapa, propia de este trabajo, y lo registrado en la literatura.

Parámetro	Digestores Mesofílicos				Otros Autor es.	Digestores Termofílicos				Otros Autor es.
	1ª Etapa		2ª Etapa			1ª Etapa		2ª Etapa		
	M1	M2	M1	M2		T1	T2	T1	T2	
TRH	12	12	15	35	15	10	10	20	20	10
Eliminación en la Bv (%)	29.2	33.3	42.5	20.9	47-50	31.7	44.7	N.D	63.3	40-60
% RSV	11.5	N.D.	83.7	30.8	45-60	N.D.	18.1	73.5	57.9	50-85
mL. CH ₄ TPN/g SSV _{alim.}	7.9	.36	80.5	21.7	204	0.08	N.D	45.9	28.3	129

Otros autores: Krugel *et al.*, 1998; Cecchi *et al*, 1992; Kayhanian y Rich, 1995.

Se puede apreciar el aumento en la capacidad de los reactores para la estabilización de los lodos, ya que en el caso de los termofílicos la reducción de la fracción volátil pasó de 18.1% en la etapa de arranque hasta un 73.5 y 57.9% en la segunda etapa para cada digestor termofílico. Estos valores también aumentaron de 11.5 a 83.7 y 30.8% para cada digestor mesofílico.

Los resultados obtenidos a lo largo del periodo experimental demuestran que la digestión anaerobia es un proceso adecuado para la estabilización de los lodos residuales, dada la capacidad del proceso para la eliminación de la materia orgánica y de mineralizar los compuestos orgánicos a metano y CO₂.

Los mejores resultados de estabilización se lograron con los lodos biológicos, ya que estos no presentaban problemas de pH ni de alto contenido de ácidos grasos volátiles en la alimentación, a la vez que no contenían precipitados metálicos como el aluminio.

5.5 Seguimiento de los microorganismos patógenos y parásitos

Para comprobar que la digestión anaerobia es un proceso adecuado para la estabilización de los lodos de desecho y su eventual disposición como biosólidos, es necesario corroborar que con este proceso se logra la eliminación de microorganismos causantes de enfermedades como son los patógenos y parásitos. Por tal motivo, uno de los objetivos de este trabajo fue realizar los análisis microbiológicos correspondientes tanto para los patógenos (coliformes) como para los parásitos (HH), esto con el fin de verificar si existe remoción de estos microorganismos en los digestores; así como determinar el papel de la temperatura en su eliminación. Los análisis microbiológicos se realizaron para coliformes y huevos de helmintos.

Los resultados mostraron que a 35°C no se tuvo una eliminación de coliformes fecales, ya que las cantidades que salen de los digestores son similares a las que entran y no se aprecia una diferencia significativa. A continuación se presentan las gráficas donde se presentan los resultados obtenidos en los digestores mesofílicos.

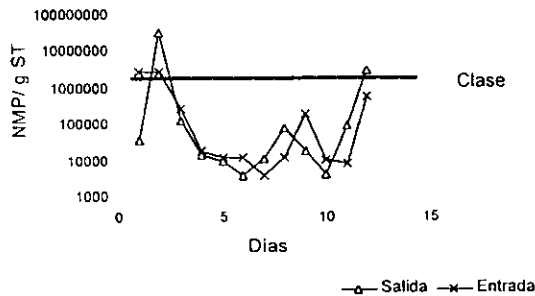


Figura 5.13 Número más probable de coliformes fecales en el digestor mesofílico M1 alimentado con lodo biológico

De acuerdo con la figura 5.13 se puede observar que el lodo tiene, en cuanto a este parámetro, características de lodo clase B; solo en dos ocasiones no cumple con esta clasificación. Sin embargo, no se puede observar una reducción de la cantidad de coliformes fecales.

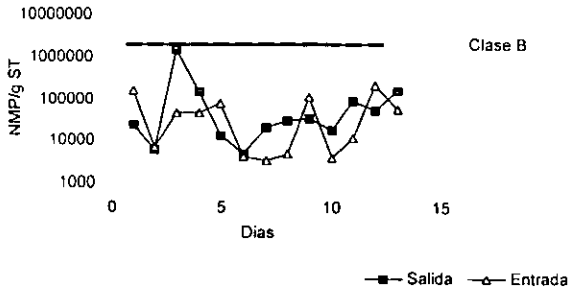


Figura 5.14 Números más probable de coliformes fecales en el digestor mesofílico (M2) alimentado con lodo TPA

En el caso del digestor M2, se puede observar que al igual que M1, el lodo cumple en este parámetro con la clasificación clase B y que no existe remoción de organismos coliformes e incluso en la mitad de las determinaciones existe una cuenta mayor en el lodo del digestor que en el alimentado. Esto sugiere que la temperatura está actuando como un factor que favorece el desarrollo de organismos de tipo fecal en el digestor, sin descartar variaciones propias en la aplicación de la técnica empleada.

Para que la digestión anaerobia mesofílica mejore en la reducción de organismos patógenos, es necesario se lleve a cabo en dos fases para de esta manera lograr una mayor reducción en los indicadores bacterianos (como son coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales), que en la digestión anaerobia convencional (Bitton, 1994).

Los resultados obtenidos de los digestores termofílicos mostraron que estos sí lograron una eliminación de coliformes fecales, ya que de su entrada, en el lodo biológico, con cuentas mayores a 2×10^6 NMP/ g ST se lograron reducir hasta obtener menos de 1000 NMP/ g ST en cada uno de los digestores termofílicos, propios de clase A (Figura 5.15 y 5.16). Sin embargo, en ocasiones se midieron coliformes por arriba de este número, sobre todo en el digestor T2, alimentado con lodos TPA. Tales resultados pudieron deberse a que el mezclado no se llevó a cabo en forma completa, por lo que el tiempo de permanencia del lodo no fue el suficiente para que la temperatura ejerciera su efecto sobre los microorganismos. Aunado a este problema, se tuvieron además algunas dificultades para mantener la misma temperatura dentro del digestor.

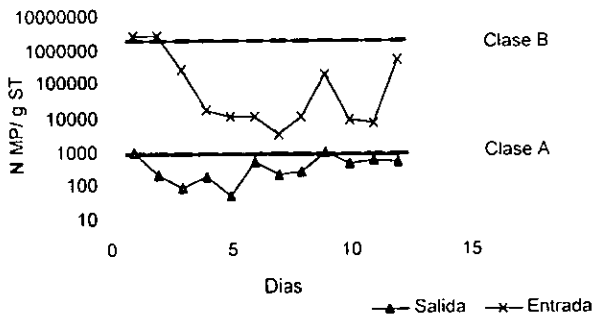


Figura 5.15 Número más probable de coliformes fecales en el digestor termofílico (T1) alimentado con lodo biológico

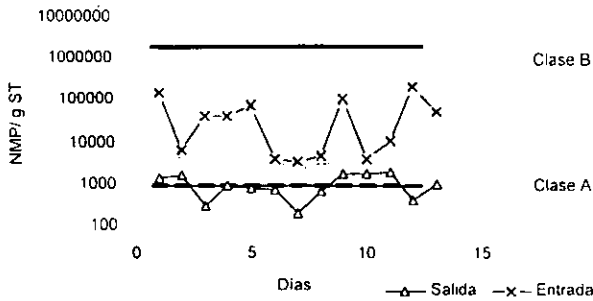


Figura 5.16 Número más probable de coliformes fecales en el digestor termofílico (T2) alimentado con lodo TPA.

De lo anterior se puede concluir que, efectivamente, la temperatura y el tiempo de retención dentro del digestor son factores muy importantes para la reducción de estos microorganismos. La eficiencia de la digestión anaerobia termofílica para la destrucción de los organismos patógenos aumenta con la elevación de las temperaturas.

Puede considerarse que si se logra mantener un buen mezclado de los lodos que ingresan al digestor y una temperatura de 55°C será posible obtener mejores resultados en la eliminación de estos microorganismos y por lo tanto, biosólidos clase A. En este sentido Krugel *et al.*, (1998) recomiendan que el digestor termofílico sea seguido de una serie de digestores más pequeños (2 ó 3), a la misma temperatura, con objeto de asegurar un mayor tiempo de exposición a 55°C.

El que se logre tener una eliminación eficiente de los microorganismos patógenos, como son los coliformes fecales, no quiere decir que sea suficiente para lograr la eliminación de otros microorganismos que son dañinos para el hombre, como los huevos de helmintos, parásitos intestinales capaces de causar graves enfermedades e incluso, si son muy abundantes en el organismo, pueden causar la muerte.

Los resultados obtenidos de los análisis parasitológicos muestran que en los lodos residuales se encuentran las siguientes especies de huevos: *Ascaris* sp., *Trichuris* sp., *Toxocara* sp., e *Hymenolepis* sp.. De estos, el que se encontró en mayor número fue *Ascaris* sp., particularmente en los lodos TPA. En la figura 5.17 se muestran los porcentajes determinados para cada una de las especies de huevos de helminto en el digestor mesofílico M1.

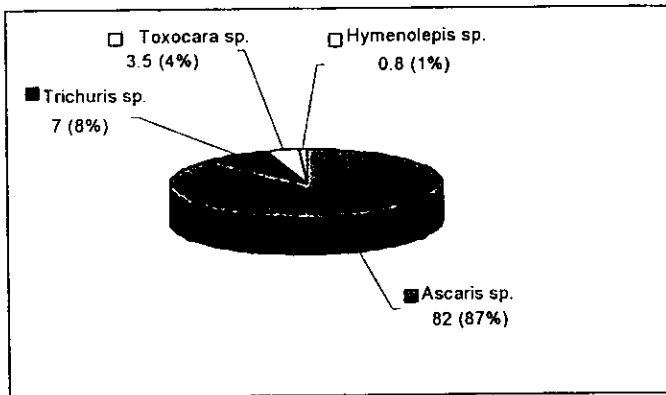


Figura 5.17 Conteo y porcentajes encontrados de huevos de helmintos en el digestor M1 alimentado con lodo biológico

Al realizar la comparación para *Ascaris* sp., por ser la especie de huevo de helminto más resistente a cualquier tratamiento de estabilización de lodos (Pike, et al. 1998), se encontró que en el caso del digestor mesofílico M1 se logró un porcentaje de remoción del 28.6% mientras que para el digestor T1 el porcentaje de remoción fue más elevado, 70.7%. Para el caso del digestor termofílico T2 se obtuvo un porcentaje de remoción de 36.6%.

En la tabla 5.7 se muestra una comparación de huevos totales de *Ascaris* sp., encontrados en el lodo biológico de entrada así como los encontrados a la salida de los digestores a las diferentes temperaturas de operación.

Tabla 5.7 Comparación de huevos de *Ascaris* presentes en el lodo biológico así como en los digestores M1 y T1.

	Lodo Aerobio (HH/ g ST)	M1 35°C (HH/ g ST)	T1 55°C (HH/ g ST)
Larvados (viables)	8.71	2.57	0.28
Sin Larvar (no viables)	8.0	9.1	4.6
Total	16.4	11.7	4.8
% Viables	51.3	22	5
% No viables	48.7	77.8	95.8
% Remoción		28.6	70.7

Al realizar la comparación entre las diferentes condiciones de temperatura, se encontró que a la temperatura de 55°C se logró un porcentaje de remoción mucho mayor que a 35°C, de donde se deduce que en la digestión anaerobia mesofílica los huevos de nemátodos parásitos sobreviven con facilidad (*Ascaris*, *Trichuris* y *Toxocara*).

Así mismo, la eficiencia de la digestión anaerobia termofílica para la destrucción de los huevos de helmintos aumenta con la aplicación de temperaturas superiores a 55°C, que fue la temperatura manejada en este trabajo. Este factor juega un importante papel en la inactivación de virus en los lodos (Bitton, 1994).

Tabla 5.8 Comparación de huevos de helmintos totales presentes en el lodo biológico así como en los digestores M1 y T1

	Lodo Aerobio (HH/ g ST)	M1 35°C (HH/ g ST)	T1 55°C (HH/ g ST)
Larvados (viables)	8.72	2.57	0.26
Sin Larvar (no viables)	11.69	10.71	6.2
Total	20.4	13.29	6.45
% Viables	42.7	19.3	4
% No viables	57.3	81	96
% Remoción total		34.85	68.4

En termofilia el porcentaje de remoción fue de 68.4% mientras que en mesofilia fue de 34.8% para la totalidad de huevos encontrados en las muestras de estos dos digestores.

Se puede establecer que la temperatura y el tiempo de retención de lodos fueron los factores que contribuyeron a la eliminación de la viabilidad de los huevos de helmintos. Se logró obtener biosólidos clase A para los lodos que se sometieron a una temperatura de 55°C, de acuerdo con la futura NOM – 004, y posteriormente se alcanzó la especificación de la EPA, que es menor a 0.25 HH/g ST.

En la Norma Oficial Mexicana (NOM – ECOL – 004) que se encuentra en preparación, los límites permisibles de huevos de helmintos serán de 35 huevos por gramo de sólidos totales para la clase B mientras que para la clase A serán de 10 HH/ g ST.

Cabe hacer mención que de acuerdo con este proyecto de norma, los lodos crudos cumplirían con la clasificación en cuanto a los HH de los lodos clase B y que para la obtención de los lodos clase A solo se requeriría de la eliminación de un poco más de 6 HH. Esto habla del poco rigor para establecer una calidad microbiológica adecuada en el caso de la normatividad nacional, ya que se estarán liberando al ambiente cantidades importantes de HH por cumplir la clasificación para lodos clase A, que se podrán usar en los lugares donde exista riesgo de contacto humano.

En la figura 5.18 se puede ver con mayor claridad que hay un mayor porcentaje de reducción de los huevos larvados en el digestor termofílico.

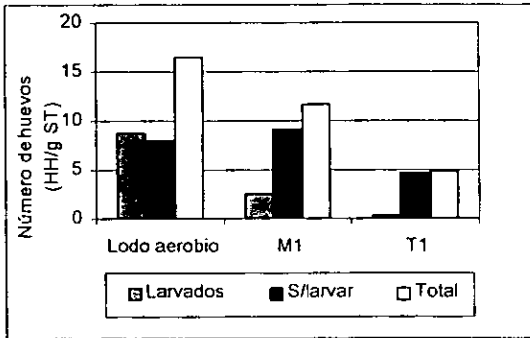


Figura 5.18 Número total de huevos de *Ascaris* sp. encontrados en el lodo biológico así como en los digestores M1 y T1.

Se puede observar que la digestión anaerobia termofílica es la que presenta un alto grado de estabilización de los lodos biológicos, ya que a la salida del digestor T1 se logró una gran reducción del número total de huevos de *Ascaris* sp.. De un total de más de 15 HH/ g ST que ingresaron al digestor salían menos de 5 HH/ g ST y menos de 1 presentaron desarrollo de larva. Así se puede observar que el digestor T1 fue el que presentó una menor cantidad de huevos larvados o viables de *Ascaris* sp., mientras que en el digestor M1 el número de huevos larvados fue mayor a tres. Estas cantidades son muy bajas en comparación con los huevos que se presentaron en el lodo biológico de alimentación ya que como se observa en la figura 5.18 este lodo presentó una cantidad mayor a 8 huevos larvados de *Ascaris* sp., al ingresar al digestor.

Como se muestra en la tabla 5.8, se encontró que el digestor T1 fue el que presentó un mayor porcentaje de HH no viables (96%) y un porcentaje de remoción de 70.7%; mientras que el digestor M1 solo logró un porcentaje de remoción de 28.6%.

En los digestores que se alimentaron con lodo TPA (Tratamiento primario avanzado) no fue posible hacer una comparación entre las eficiencias de eliminación entre las dos temperaturas, ya que al momento de realizar estos análisis, el digestor M2 presentó problemas de acidificación por lo que sólo fue posible muestrear lodos para las pruebas de pH y alcalinidad, obteniéndose sólo una muestra para las pruebas de huevos de helmintos. Para el digestor termofílico T2, se realizaron las siete planeadas.

A continuación se muestra la tabla 5.9 con los resultados obtenidos para los digestores alimentados con el lodo TPA, en la que se puede observar que el digestor T2 presentó un porcentaje de remoción de 36.67%, y un 98.6% de huevos no viables.

Tabla 5.9 Comparación de huevos de *Ascaris* sp., presentes en el lodo TPA así como en los digestores M2 y T2

	Lodo TPA (HH/ g ST)	M2 35°C* (HH/ g ST)	T2 55°C** (HH/ g ST)
Larvados (viables)	24	3	0.3
Sin Larvar (no viables)	9	83	20.6
Total	33	86	20.9
% Viables	72.75	4.48	4
% No viables	27.25	96.52	98.6
% Remoción total		N.D	36.67

*1 sola muestra; ** 7 muestras.

En la figura 5.19 se observa que en el digestor T2 se encontró la menor cantidad de huevos de *Ascaris* sp., ya que de más de 33 HH/ g ST que ingresaron al digestor, salieron menos de 21 y de estos, menos de 1 (0.3) se encontró larvado.

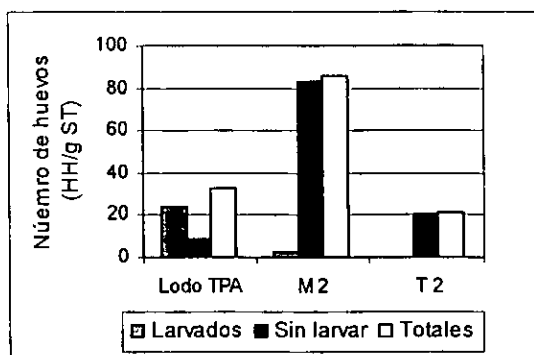


Figura 5.19 Número total de huevos de *Ascaris* sp., encontrados en el lodo crudo TPA así como en los digestores M2 y T2

En la tabla 5.10 se puede observar que aunque no se puede realizar una comparación entre las dos temperaturas trabajadas, para el lodo TPA, también se encontró un porcentaje de remoción más alto en el digestor T2 ya que este fue de 99.1% mientras que en el M2 fue de 96.84%.

Tabla 5.10 Comparación de huevos de helminto totales presentes en el lodo TPA, así como en los digestores M2 y T2.

	Lodo TPA (HH/ g ST)	M2 35°C* (HH/ g ST)	T2 55°C** (HH/ g ST)
Larvados (viables)	23.29	0.6	0.3
Sin Larvar (no viables)	11.61	18.4	23.36
Total	34.57	19	23.56
% Viables	67.4	3.16	1.27
% No viables	33.3	96.84	99.1
% Remoción total		45.03	31.84

(*1 sola muestra; ** 7 muestras).

En cuanto a las otras especies de huevos de helmintos encontrados en los dos tipos de lodo de alimentación; así como en los digestores, se encontraron en cantidades menores a los huevos de *Ascaris* sp.. Para los huevos de *Toxocara* sp., *Hymenolepis* sp., y *Trichuris* sp., se contaron menos de 5 HH por muestra y de éstos uno de cuatro se encontraron larvados, solo para los huevos de *Toxocara* sp., ya que para las otras dos especies no se encontró desarrollo de larva. Estos resultados se pueden observar en el anexo 3, en donde se presentan las tablas de todos los resultados obtenidos tanto en los análisis fisicoquímicos como microbiológicos.

A continuación y como parte de los resultados de esta parte experimental, se presentan algunas fotografías de los huevos de helminto que fueron encontrados tanto en los lodos utilizados como sustratos como en los lodos de salida de cada



uno de los digestores

A)



B)

Figura 5.20 Fotografías de *Ascaris* sp., A) huevo infértil. B) Huevo fértil presentando larva en estadio L2

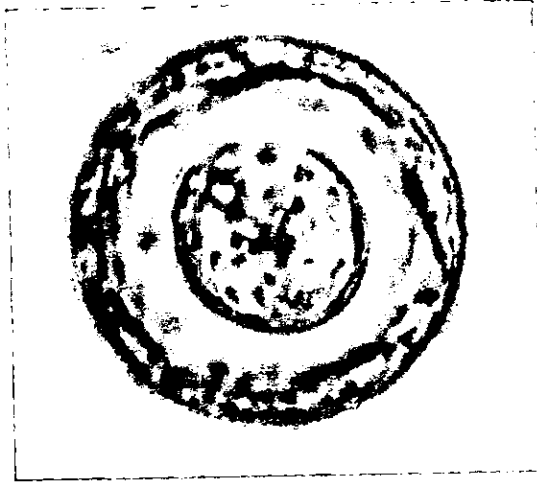


Figura 5.21 Huevo infértil de *Hymenolepis* sp.

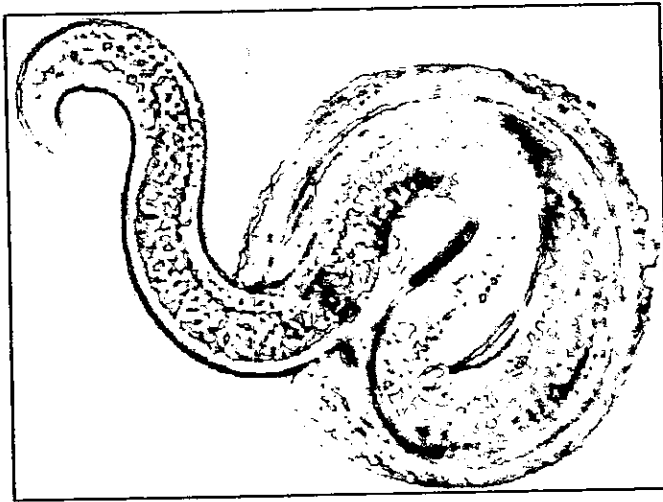


Figura 5.22 Fotografía que muestra la eclosión de un huevo de *Toxocara* sp.

La figura 5.22 se obtuvo de una muestra de lodo TPA proveniente de la planta de San Pedro Atocpan. La muestra fue incubada por un periodo de cuatro semanas a 26°C en una solución de H₂SO₄ 0.1 N

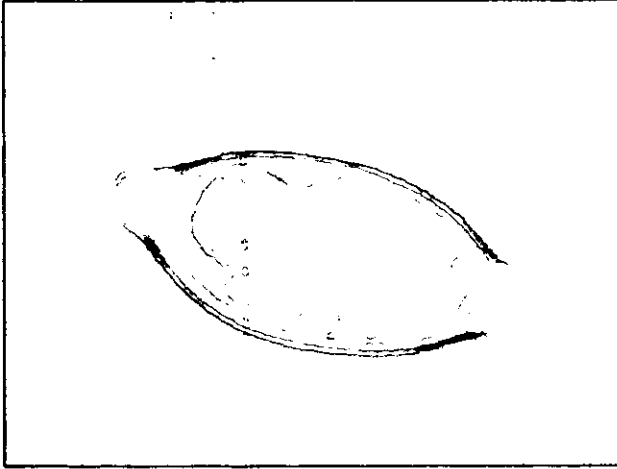


Figura 5.23 Huevo infértil de *Trichuris* sp.

6 CONCLUSIONES

- ◇ Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran la factibilidad de la digestión anaerobia termofilica para la estabilización orgánica y sanitaria de los lodos residuales, ya que se logró una buena eliminación de la materia orgánica; así como de coliformes fecales y huevos de helmintos.
- ◇ Los resultados microbiológicos mostraron que para los lodos biológicos, tratados bajo condiciones de termofilia, se logró la obtención de biosólidos con características prácticamente idénticas a las especificadas para los lodos clase A, descritos en la regla 40 – 503 de la EPA.
- ◇ El factor más importante para la eliminación de estos microorganismos fue la temperatura; así como el tiempo en que los lodos permanecieron dentro del digestor.
- ◇ En el caso de los lodos TPA (tratamiento primario avanzado) los resultados obtenidos muestran que en termofilia se lograron obtener mejores resultados, que en mesofilia para este tipo de lodos, al obtener biosólidos clase A ya que los microorganismos patógenos se encontraron por debajo de los límites de 1000 NMP/ g ST.
- ◇ En cuanto a los resultados que se obtuvieron para los microorganismos parásitos, aunque estos no son comparables para los digestores alimentados con este lodo, fue posible establecer una comparación entre ambos digestores termofilicos con lo que se enfatiza que a temperaturas superiores a los 40°C y -

muy cercanas a la pasteurización (55°C) fue factible alcanzar un alto grado de reducción de la viabilidad de estos microorganismos ya que los resultados obtenidos para ambos digestores termofílicos muestran un porcentaje de organismos no viables mayor al 70%.

- En cuanto a la digestión anaerobia mesofílica para ambos lodos, se encontró que aunque se esté llevando a cabo una reducción de los sólidos volátiles de más del 30.8%, la reducción de los organismos patógenos y parásitos no es suficiente para producir biosólidos clase A.

7. RECOMENDACIONES

- Es necesario que se realicen estudios más profundos sobre posibles efectos inhibidores que pueda tener el aluminio en la digestión anaerobia de lodos producidos por tratamiento primario avanzado con sulfato de aluminio como coagulante.
- Es conveniente realizar experimentos con un arreglo en serie de 2 ó 3 digestores termofílicos, de mezclado completo, con el objeto de asegurar que el lodo en digestión permanezca un tiempo semejante al tiempo de retención hidráulica, y con ello reducir en forma consistente los coliformes fecales por debajo de los límites de la normatividad en la materia.

7. Bibliografía

Citada y consultada:

- Aiken, M.D., and Mullennix, R. W. (1992). **Another look at thermophilic anaerobic digestion of wastewater sludge**. Env. Res. 64 (7): 915 – 919.
- APHA. AWWA.WPCF. (1992). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 18 th edition. Pp 10 -1130
- Barrios, J.A., Jiménez, B., González, O., Salgado, G. (2000). **Destrucción de coliformes y huevos de helminto en lodos fisicoquímicos por vía ácida**. Artículo para el XII Congreso Nacional FEMISCA, Morelia, Michoacán. Pp 5.
- Bitton, G. (1994). **Wastewater Microbiology**. A John Wiley & Sons ,INC., publication, New York. Pp 448.
- Blanco, T. J., Arlandis, J.G. (1990). **Atlas de coprología: Digestión y parásitos**. Asociación Española de farmacéuticos analistas. Pp. 87 – 123.
- Brock, T. D. Smith, D. W., Madigan, M: T. (1987). **Microbiología**. Cuarta Edición. Prentice – Hall Hispanoamericana, Toronto. Pp. 875.
- Cabirol. N., Noyola, R.A., Ortega, L.S., Barragán, E.J., Castro, O.L.P., Rojas, O.M., Vargas, T.G (1998). **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
- Cecchi. F., Pavan, P., Musacco, A., Mata – Alvarez. J. and Sanc. C. (1992) **Comparison between thermophilic and mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge coming from urban wastewater treatment plants**. Wat. Sci. Tech. 26 (9-11): 2409 – 2412.
- Domínguez, A. A. (1994). **Estudio del efecto de la presión hidrostática sobre la granulación del lodo anaerobio**. Tesis de licenciatura de Biología. Escuela Nacional de Estudios profesionales (ENEP) Iztacala. UNAM. Pp 160.

- Environmental Protection Agency, b. (1996). "A guide to the biosolids risk assessments for the EPA part 503 rule". Washington D.C. Estados Unidos de América.
- Environmental Protection Agency. (1992) **Environmental regulations and technology control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503**, Appendix 1, Analytical method for viable helminth ova, Washington ;D.C.
- Ferry, G. J. (Ed). (1994). **Methanogenesis ecology, physiology, biochemistry and genetics**. Edit. Chapman & Hall. USA. Pp. 180
- Gerardi, H. M. (1990). **Wastewater Biology: The microlife**. WPCF. Pp.190.
- Guzmán, A. A. (1994). **Salmonella: Análisis cualitativo y cuantitativo en lodos primarios provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales**. Tesis de licenciatura: Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. Pp. 83.
- Hamer, G. D., Brieyrs, J.D and Berger, J. (1988). **Thermophilic Anaerobic Digestion for sewage sludge stabilization**. Acta Biotec. 5 (3): 226 – 234.
- Herbert, H. P. (1996). **Start - up of thermophilic (55°C) UASB reactors using different mesophilic seed sludges**. Wat. Sci. Tech. 34 (5): 445 – 452.
- Hernández, F. O. (1998). **Análisis de factibilidad técnico económica del tratamiento de lodos producidos por la planta de tratamiento de agua residual Texcoco norte (estudio prospectivo)**. Tesis de licenciatura de ingeniería civil. UNAM. Pp.160.
- Jackson – Moss, C.A. and Duncan, J.R. (1991). **The effect of aluminium on anaerobic digestion**. Biotechnology letters. 13 (2): 143 –148.
- http://www.cd.found.to.it/_atlas.htm. Por Dra. Jiménez, B., I.Q. Salgado, V.G., Biol. Castro, O. L.P., Dra. Cabirol, N. Laboratorio de microbiología, grupo tratamiento y reuso. Coordinación de Bioprocesos Ambientales y Coordinación de Ingeniería Ambiental. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Jenkins, S.R., Morgan, J.M., Sawyer, C.L. (1983). **Measuring anaerobic sludge digestion and growth by simple alkalimetric titration**. J. Wat. Pollut. Control Fed., 55 (5): 448 – 453

- Jiménez, C.B., Mejía C.A., Barrios P.J., Salgado, V. G.(1999). **Curso: Determinación y cuantificación de huevos de helminto. Técnica Norma oficial NMX – AA –113 – SCFI.** Grupo tratamiento y reuso, Instituto de Ingeniería de la UNAM. Pp 131
- Kayhanian, M. and Rich, D. (1995). **Pilot – scale high solid thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requeriments.** Biomass and Bioenergy. 8 (6): 433 – 444.
- Krugel, S., Nemeth, L. and Peddie C. (1998). **Extending thermophilic anaerobic digestion for producing class A bisolids at the Greater Vancouver regional district's Anaacis island wastewater treatmen plant.** Wat. Sci. Tech. 38 (8 – 9): 409 – 416.
- Lamothe, A. R., Gracia, P.L. (1988). **Helmintiasis del hombre en México: tratamiento y profilaxis.** AGT editor, S.A. México. Primera edición. Pp. 130.
- Lester, N. J. (1987). **Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes.** Vol. III Treatment and Disposal. CRC. Pres. Inc. Boca Ratón Florida. Pp. 47.
- Metcalf & Eddy. Inc. (1996). **Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización.** Tomo 1y 2 MacGraw – Hill. Pp. 1041
- Metcalf & Eddy. Inc.(1991). **Wastewater Engineering. Treatment, Disposal reuse.** Third edition. MacGraw – Hill. Pp. 1250.
- Malina, J. and Ponlan, F. G. (1992). **Desing of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes.** 7. Water Quality Management Library.
- Moreno, R.G., Espinosa, F.A., Briones, S.R. (1993). **Tratamiento Anaerobio de Aguas residuales.** Congreso organizado por el IMTA – CNA e Instituto de ingeniería. Sede Centro de capacitación " Los Berros " Edo. de México 8 –12 Nov. Modulo II. **Microbiología de la digestión anaerobia.** Supervisor: Dr. Adalberto Noyola Robles.Pp.300.
- Murray, P. R., Kobayashi, G.S., Pfaller, M.A., Rosenthal, K.S. (1997). **Microbiología médica.** Sección VI. Parasitología. Segunda edición. Harcurt. Brece México. Sección VI. Pp. 511.
- Murray, R. K., Granner, K.D., Mayer, P.A., Robwell, V.W. (1998). **Bioquímica de Harper.** Editorial El manual moderno. S.A de C.V. México D.F. Pp 663.

- **Norma Oficial Mexicana (NOM – ECOL – 001 – 1996).** Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales publicado en el diario oficial de la federación el 06 – 01 – 1997.
- Noyola, R.A. (1990). **Tratamiento anaerobio de aguas residuales: una experiencia de adaptación de tecnología en México, en Tratamiento de aguas residuales en América Latina.** Instituto de ingeniería UNAM – México. Pp 337- 357.
- Noyola, R.A., Ortega, L.S., Castro, O.L.P., Rojas, O.M. (1998). **Digestión anaerobia termofílica y mesofílica de lodos biológicos de desecho para producción de biosólidos como mejoradores de suelos.** Informe elaborado para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGOH). Proyecto 8390. Primera etapa. Pp. 80.
- Noyola, R.A. (1998). **Diseño, inoculación y arranque de reactores UASB.** Curso: Digestión anaerobia de lodos y aguas residuales 8 al 10 de Dic. Instituto de Ingeniería UNAM, Federación Mexicana e Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. Pp.10.
- Oles, J., Dichtl, N., Niehoff, H.H. (1997). **Full scale experience of two stage thermophilic/mesophilic sludge digestion.** Wat. Sci. Tech. 36 (6 – 7): 449-456.
- Ondarza, N. R. (1984). **Biología moderna.** Editorial Trillas. 8ª. Edición. México. Pp. 84.
- Ortega, Ch. L. S. (1998). **Efectos de los lodos activados de purga sobre las características de un lecho de lodo anaerobio granular.** Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Veracruz. Pp.144.
- Ortiz, A. D. (1995). **Tratamiento biológico de aguas residuales: Eficacia de las lagunas de estabilización en la remoción de los huevos de helmitos.** Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. Pp. 130.
- Pike, E.B., Carrington, E.G., Harman, S.A. (1998). **Destruction of salmonellas, enteroviruses and ova of parasites in wastewater sludge by pasteurisation and anaerobic digestion.** Wat. Sci. Tech. 20 (12): 337 – 343.
- Ramírez, C. (1992). **Tratamiento de aguas residuales industriales.** UAM Unidad Azcapotzalco. Pp. 200.

- Rojas, O. M. (2001). **Remoción de patógenos y parásitos (coliformes 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
- Salgado, V. G. (1998). **Remoción de huevos de helminto en agua residual por cinco tecnologías diferentes sobre el sistema de tratamiento primario avanzado (TPA).** Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz. Pp. 274.
- Schimidt, G. D. (1987). **Foundations of parasitology.** Secon edition. The C.V. Mosby Compani. St. Louis, Missouri. Pp. 750.
- Sotirios, G.G., Richard, C., Vedder and Wayne, M.D., (1971). **Fate of aluminium – precipitated phosphorus in activated sludge and anaerobic digestion.** Journal WPCF. 43. (12): 2366 –2382.
- Tay, J., Castrejon, O., Aguilera, R., Quiroz M. (1990). **Parasitología médica.** Ed. Méndez Cervantes. Pp. 327.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Svigil, S.A. (1994). **Gestión integral de residuos sólidos.** Vol. III. MacGraw – Hill. México. Pp. 755 – 780
- Thomas, D. B. (1987). **Microbiología.** México, Toronto. Prentice – Hall. Hispanoamericana. S. A. Pp. 850.
- Van Lier, J.B. (1996). **Limitations of thermophilic anaerobic wastewater treatment and the consequences for process design.** *Ant. Van. Leewenhock.* 69 (1 – 4).
- Water enviromental federation. **Land applicattion of sewage sludge. A guie for appliers on the requeriments of the federal standars for the use or disposal of sewagw slegde, 40 CFR part 503.** Instituto de Ingeniería. Unidad de servicios de información. Pp. 200
- Winkler, M. (1986). **Tratamiento biológico de aguas de desecho.** Editorial Limusa. México. Pp. 323.

Anexo 1

Técnica de la NOM- 001- ECOL – 1996 para la preparación y conteo de las muestras de huevos de helminto.

Como se trata de muestras de lodo el procedimiento a seguir es un poco diferente que para aguas

- 1- Se preparan recipientes de plástico de boca ancha con capacidad para 5 l de agua.
- 2- Se toman X gramos de materia fresca (húmeda) correspondientes a 5 g de materia seca
- 3- La muestra se pasará por un tamiz de 160 μm enjuagando el recipiente en donde se encontraba la muestra con 5 l de agua potable o destilada.
- 4- Dejar sedimentar durante tres horas o toda la noche.
- 5.- Aspirar el sobrenadante al máximo y depositar el precipitado en botes de centrifuga de 250 ml, incluyendo varios enjuagues del recipiente de 5 l.
- 6- Centrifugar a 1400 –2000 r.p.m. por 5 min.
- 7- Decantar el sobrenadante por vacío y resuspender la pastilla en un bote de 150 ml ZnSO_4 con una densidad de 1.3.
- 8- Homogeneizar bien la pastilla con ayuda de agitador automático o un aplicador de madera
- 9- Centrifugar la muestra a 1400 –2000 r.p.m. por 5 min.
- 10- Recuperar el sobrenadante en un recipiente de más de 1 l y diluir cuando menos en un litro de agua destilada.
- 11- Dejar sedimentar durante tres horas o toda la noche.
- 12- Aspirar al máximo el sobrenadante por medio de vacío y resuspender el sedimento agitando, verter el líquido resultante en 2 tubos de centrifuga de 50 ml con lavados sucesivos del recipiente anterior con agua destilada.
- 13- Centrifugar la muestra a 2000 - 2500 r.p.m. por 5 min.
- 14-Recuperar la pastilla en un tubo de 50 ml y centrifugar la muestra a 2000 - 2500 r.p.m. por 5 min.
- 15- Resuspender la pastilla en 15 ml de solución de alcohol – ácido y adicionar 10 ml de éter etílico.
- 16- Agitar suavemente y abrir de vez en cuando los tubos para dejar escapar el gas (esto se hace bajo una campana de extracción).

17- Centrifugar la muestra a 2500 – 3000 r.p.m. por 5 min.

18- Aspirar al máximo el sobrenadante para dejar menos de 1 ml de muestra, homogeneizar la pastilla y proceder a la cuantificación.

19- Realizar un barrido al microscopio óptico en una cámara de conteo **Doncaster** para la identificación de las muestras.

Se utilizaron 5 g ya que más muestra era demasiada y no permitiría hacer una cuantificación adecuada, por el exceso de sedimento que se tenía y que no fue posible eliminar al 100%.

Anexo 2

TÉCNICAS ANALÍTICAS Y CÁLCULOS

Alcalinidad

La alcalinidad total y de bicarbonatos fue determinada por titulación con H_2SO_4 0.2 N a pH de 5.75 y subsecuentemente pH de 4.30. Mediante la titulación al punto de 5.75 se cuantifica la alcalinidad debida a bicarbonatos, mientras que el consumo de ácido al punto de 4.30 titula la alcalinidad total incluyendo la debida a los ácidos grasos volátiles. Ambos de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Alcalinidad (mgCaCO}_3\text{/ L)} = \frac{(\text{ml H}_2\text{SO}_4) (\text{N H}_2\text{SO}_4)(50000)}{\text{MI de muestra}}$$

Alfa (α)

La determinación de alfa α se realizó de acuerdo a Ripley (1989) Ortega (1998), mediante la relación de alcalinidad de bicarbonatos entre la alcalinidad total, de acuerdo con la siguiente formula:

$$\alpha = \frac{\text{Alcalinidad}_{\text{bicarbonatos pH 5.75}}}{\text{Alcalinidad}_{\text{total pH 4.30}}}$$

Sólidos, pH.

La determinación de los sólidos en todas sus formas (SST, SSV, SSF); así como la determinación del pH se realizaron de acuerdo a los Métodos Estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Biogás.

Las muestras de biogás obtenidas a la salida correspondiente de los reactores, por medio de una jeringa, fueron inyectadas a un cromatógrafo de gases, para conocer su composición, con detector de conductividad térmica marca Fisher Gas Partitioner, modelo 1200, cuya temperatura del inyector fue de 120-130°C, la temperatura de la columna fue de 50°C y la fase móvil fue helio a un flujo de 25 ml/ min. El volumen de la muestra inyectada fue de 0.5 ml. La calibración se hizo inyectando diferentes volúmenes de gases purificados de CH_4 y CO_2 , posteriormente se construyeron las curvas correspondientes en las que se interpolaron los valores experimentales.

Anexo 3

RESULTADOS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL DIGESTOR M1

Día	Fecha	pH	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	Alfa	Biogas (mL/d)	Metano (%)	CO ₂ (%)	Alimentación (mL/d)	Bv entrada (gSSV/L d)
1	02/06/99	7.2	2880	0.21	50	70.37	29.63	100	
2	03/06/99	7.4	3120	0.47	70	69.32	30.68	100	
3	04/06/99	7.07	3200	0.56	50	67.94	32.06	200	
4	05/06/99	7.13	2680	0.58		68.22	31.78	200	
5	06/06/99				80				
6	07/06/99	7.12	2800	0.54	80	68.75	31.25	300	2.8
7	08/06/99	7.18	2880	0.62		68.22	31.78	300	
8	09/06/99	6.39	2920	0.59	130	67.67	32.33	300	0.3
9	10/06/99	7.24	2920	0.54	140	67.20	32.80	300	
10	11/06/99	7.14	2520	0.58	170	66.01	33.99	300	2.7
11	12/06/99	7.01	2800	0.5	10	66.15	33.85	300	
12	13/06/99				5				
13	14/06/99	7.2	3360	0.48	5	66.49	33.51	300	1.6
14	15/06/99	6.95	2520	0.47		66.67	33.33	300	
15	16/06/99	7.8	2920	0.57	150	66.50	33.50	300	0.70
16	17/06/99	7.28	2680	0.56	260	65.85	34.15	300	
17	18/06/99	7.01	2520	0.58	920	62.86	37.14	300	0.74
18	19/06/99	7.2	2800	0.57	920	65.17	34.83	300	
19	20/06/99				400				
20	21/06/99	7.15	2520	0.61	400	68.78	31.22	300	0.7
21	22/06/99	7.32	2840	0.74	450	68.42	31.58	300	
22	23/06/99	7.21	2720	0.67	330	66.51	33.49	300	0.67
23	24/06/99	7.23	2560	0.62	530	67.83	32.17	300	
24	25/06/99	7.2	2640	0.63	540	66.44	33.56	300	0.84
25	26/06/99	7.01	2600	0.61	590	66.01	33.99	300	
26	27/06/99				440				
27	28/06/99	7.23	2680	0.7	440	67.31	32.69	400	1.16
28	29/06/99	6.98	2840	0.64	420	66.46	33.54	400	
29	30/06/99	7.04	2800	0.64	540	66.00	34.00	400	1.037
30	01/07/99	7.21	2640	0.606	370	65.68	34.32	400	1.014
31	02/07/99	7.12	2720	0.647		66.07	33.93	350	
32	03/07/99	7.12	2760	0.623	470	65.12	34.88	350	1.136
33	04/07/99				235				
34	05/07/99	7.15	3000	0.586	235	65.88	34.12	350	
35	06/07/99	7.08	3120	0.551	170	65.93	34.07	350	0.964
36	07/07/99	7.15	3120	0.525	220	65.91	34.09	350	
37	08/07/99	7.21	2720	0.72	150	67.92	32.08	350	0.976
38	09/07/99	7.32	2680	0.686	370	67.25	32.75	350	
39	10/07/99	7.15	2480	0.645	270	67.04	32.96	350	0.952
40	11/07/99				500				
41	12/07/99	7.34	2760	0.695	500	68.62	31.38	300	
42	13/07/99	7.42	3360	0.595	650	68.52	31.48	200	1.050
43	14/07/99	6.99	2760	0.652	640	69.77	30.23	200	
44	15/07/99	7.28	2560	0.796	1000	68.55	31.45	300	1.020
45	16/07/99	7.04	2520	0.730	800	68.59	31.41	300	
46	17/07/99	7.13	2600	0.661	900	67.66	32.34	300	1.090
47	18/07/99				465				

Lourdes Patricia Castro Ortiz
2001

48	19/07/99	7.16	2680	0.626	465	67.48	32.52	300	
49	20/07/99	7.17	2840	0.634	960	67.66	32.34	300	1 050
50	21/07/99	7.16	2680	0.701	960	67.05	32.95	300	
51	22/07/99	7.22	2720	0.720	1000	66.67	33.33	300	
52	23/07/99	7.18	2480	0.693	460	68.86	31.14	300	
53	24/07/99	7.27	2080	0.904	850	68.24	31.76	300	1 006
54	25/07/99				500				
55	26/07/99	7.37	2800	0.686	500	68.82	31.18	300	0.830
56	27/07/99	7.33	2560	0.719	950	69.27	30.73	300	
57	28/07/99	7.25	2640	0.773	950	70.00	30.00	350	0.510
58	29/07/99	7.21	2520	0.683	610	70.29	29.71	350	
59	30/07/99	7.24	2680	0.716	630	69.14	30.86	350	0.800
60	31/07/99	7.14	2440	0.689	770	69.59	30.41	350	
61	01/08/99				425				
62	02/08/99	7.18	2400	0.700	425	69.36	30.64	350	0.820
63	03/08/99	7.01	2360	0.661		72.22	27.78	350	
64	04/08/99	7.12	2640	0.682	900	69.28	30.72	350	0.814
65	05/08/99	7.05	2280	0.719		47.06	52.94	350	
66	06/08/99	7.14	2200	0.673	740	68.07	31.93	350	0.769
67	07/08/99	7.09	2280	0.719	580	68.48	31.52	350	
68	08/08/99				375				
69	09/08/99	7.08	2160	0.852	375	69.28	30.72	350	0.894
70	10/08/99	6.99	2200	0.709	20	67.57	32.43	350	
71	11/08/99	7.18	2280	0.733	1000	66.91	33.09	350	0.990
72	12/08/99	7.18	2400	0.750	670	68.28	31.72	350	
73	13/08/99	7.14	2240	0.768	900	68.36	31.64	350	0.988
74	14/08/99	7.04	2360	0.729	350	67.96	32.04	350	
75	15/08/99				500				
76	16/08/99	7.21	2320	0.603	500	68.85	31.15	350	0.976
77	17/08/99	7.28	2440	0.820	1000	67.96	32.04	350	0.987
78	18/08/99	7.04	2360	0.780	830	67.78	32.22	350	
79	19/08/99	7.17	2640	0.652	1000	67.43	32.57	350	1.020
80	20/08/99	7.12	2440	0.656	820	67.84	32.16	350	
81	21/08/99	7.14	2720	0.618	920	67.26	32.74	350	0.988
82	22/08/99				500				
83	23/08/99	7.22	2520	0.667	500	67.98	32.02	350	
84	24/08/99	7.29	2640	0.667	1000	69.40	30.60	350	0.942
85	25/08/99	7.40	2360	0.712	630	68.97	31.03	350	
86	26/08/99	7.22	2200	0.709	750	68.89	31.11	350	0.948
87	27/08/99	7.14	2440	0.803	800	67.69	32.31	350	
88	28/08/99	7.15	2360	0.661	980	68.16	31.84	350	
89	29/08/99				500				
90	30/08/99	6.95	2280	0.649	500	69.54	30.46	350	
91	31/08/99	7.19	2480	0.694	1000	68.42	31.58	350	0.932
92	01/09/99	7.16	2320	0.707	650	67.76	32.24	350	
93	02/09/99	7.14	2080	0.692		68.31	31.69	350	0.940
94	03/09/99	7.20	2240	0.732	970	67.98	32.02	350	
95	04/09/99	7.10	2280	0.684	900	68.18	31.82	350	0.940
96	05/09/99				460				
97	06/09/99	7.24	2280	0.770	460	67.93	32.07	350	
	No. datos	83	83	83	83	83	83	83	39
	Promedio	7.16	2,600.48	0.66	540	67.57	32.43	321.08	1.01
	Des. Está.	0.15	277.94	0.10	300.81	2.68	2.68	53.03	0.46

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL DIGESTOR M2

Día	Fecha	pH	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	Alfa	Biogas (mL/d)	Metano (%)	CO ₂ (%)	Alimentación (mL/d)	Bv entrada (gSSV/L·d)
1	02/06/99	6.83	4960	0.22	200	55.78	44.22	200	
2	03/06/99	6.81	5840	0.22	330	75.76	24.24	100	
3	04/06/99	7.09	5560	0.24	500	57.25	42.75	100	
4	05/06/99	6.67	5084	0.24	100	59.35	40.65	100	
5	06/06/99				480				
6	07/06/99	6.82	4800	0.27	480	62.26	37.74	200	1.580
7	08/06/99	6.96	5120	0.29	200	61.49	38.51	200	
8	09/06/99	7.01	5960	0.27	100	58.45	41.55	100	0.830
9	10/06/99	7.01	5160	0.31	400	59.18	40.82	200	
10	11/06/99	6.85	5120	0.25	560	60.42	39.58	200	1.730
11	12/06/99	6.79	5080	0.28	530	58.15	41.85	150	
12	13/06/99				375				
13	14/06/99	7.01	5400	0.22	375	62.75	37.25	150	1.230
14	15/06/99	6.63	4120	0.32	500	59.30	40.70	150	
15	16/06/99	6.75	4520	0.27	600	58.87	41.13	150	1.320
16	17/06/99	6.93	5280	0.25	600	59.90	40.10	150	
17	18/06/99	6.65	4360	0.23	780	55.12	44.88	150	1.730
18	19/06/99	6.99	5080	0.33	320	60.27	39.73	200	
19	20/06/99				45				
20	21/06/99	6.72	4560	0.26	45	65.20	34.80	200	1.280
21	22/06/99	6.8	5520	0.22	90	60.78	39.22	150	
22	23/06/99	6.74	5640	0.21	90	61.15	38.85	150	1.600
23	24/06/99	6.68	4800	0.23	70	60.87	39.13	150	
24	25/06/99	6.74	5840	0.2	130	56.34	43.66	150	1.340
25	26/06/99	6.48	3800	0.25	40	72.73	27.27	150	
26	27/06/99				105				
27	28/06/99	6.72	5600	0.21	105	66.92	33.08	100	0.640
28	29/06/99	6.51	5120	0.2	140	63.16	36.84	125	
29	30/06/99	6.72	5320	0.23	110	79.21	20.79	100	0.770
30	01/07/99	6.82	4400	0.218		33.33	66.67	100	0.820
31	02/07/99	7.19	5520	0.26		96.23	3.77	125	
32	03/07/99	6.78	5520	0.202		33.33	66.67	150	1.260
33	04/07/99								
34	05/07/99	6.85	5600	0.214		69.74	30.26	100	
35	06/07/99	6.83	4720	0.322	30	73.58	26.42	100	0.860
36	07/07/99	6.8	5160	0.201	45	73.63	26.37	100	
37	08/07/99	6.71	4960	0.185	90	74.58	25.42	100	0.780
38	09/07/99	6.93	5160	0.217	75	67.38	32.62	100	
39	10/07/99	6.79	5360	0.186	110	69.86	30.14	100	0.880
40	11/07/99								
41	12/07/99	7.35	4760	0.285		77.78	22.22	110	
42	13/07/99	7.36	5440	0.308			100.00	110	0.520
43	14/07/99	7.12	4320	0.314		71.43	28.57	100	
44	15/07/99	7.00	5040	0.262	30	75.00	25.00	100	0.570
45	16/07/99	6.79	4240	0.254			100.00	100	
46	17/07/99	7.33	4160	0.298			100.00	100	0.450
47	18/07/99				10				

48	19/07/99	6.95	4800	0.250	10	78.31	21.69	100	
49	20/07/99	7.14	5000	0.288	80	75.19	24.81	100	0.520
50	21/07/99	6.94	4680	0.258	40	74.07	25.93	125	
51	22/07/99	7.03	4160	0.279	60	78.41	21.59	125	
52	23/07/99	7.19	4160	0.269	20	75.34	24.66	150	
53	24/07/99	7.00	4680	0.276	60	69.42	30.58	150	0.260
54	25/07/99				55				
55	26/07/99	7.14	4240	0.358	55	76.47	23.53	150	0.220
56	27/07/99	7.13	4000	0.260		77.44	22.56	150	
57	28/07/99	6.98	4200	0.286	200	75.32	24.68	150	0.970
58	29/07/99	7.00	4720	0.271	200	73.78	26.22	150	
59	30/07/99	7.00	5280	0.242	270	70.00	30.00	150	0.980
60	31/07/99	6.98	4640	0.276	320	69.59	30.41	150	
61	01/08/99				225				
62	02/08/99	6.96	4320	0.296	225	65.52	34.48	150	0.650
63	03/08/99	6.88	4360	0.303	100	77.46	22.54	150	
64	04/08/99	7.05	4000	0.340	1000	64.61	35.39	150	0.950
65	05/08/99	7.15	3840	0.344	240	62.57	37.43	150	
66	06/08/99	7.03	4120	0.340	300	61.85	38.15	150	1.000
67	07/08/99	7.06	4320	0.342	350	63.33	36.67	150	
68	08/08/99				225				
69	09/08/99	7.02	3920	0.347	225	61.08	38.92	150	0.970
70	10/08/99	6.96	4200	0.343	300	66.26	33.74	150	
71	11/08/99	7.07	3920	0.398		75.76	24.24	150	0.730
72	12/08/99	7.35	4160	0.375	70	70.99	29.01	150	
73	13/08/99	7.07	3760	0.383		73.79	26.21	150	0.690
74	14/08/99	7.12	4000	0.360	250	63.25	36.75	150	
75	15/08/99				125				
76	16/08/99	7.12	3840	0.365	125	63.03	36.97	150	0.700
77	17/08/99	7.35	3360	0.429	500	65.17	34.83	150	0.870
78	18/08/99	7.00	4320	0.370	200	63.37	36.63	150	
79	19/08/99	7.13	4080	0.363	270	62.87	37.13	150	0.930
80	20/08/99	7.23	3520	0.364	160	62.43	37.57	150	
81	21/08/99	6.98	4440	0.324	90	61.05	38.95	150	0.920
82	22/08/99				125				
83	23/08/99	7.04	4720	0.305	125	62.50	37.50	150	
84	24/08/99	7.15	4800	0.333	350	66.27	33.73	150	1.020
85	25/08/99	7.33	4480	0.321		76.47	23.53	150	
86	26/08/99				100	65.32	34.68	150	1.060
87	27/08/99	7.22	4160	0.356	10	77.32	22.68	150	
88	28/08/99	7.01	4320	0.333		77.27	22.73	150	1.080
89	29/08/99				155				
90	30/08/99	7.27	3800	0.347	155	62.57	37.43	150	
91	31/08/99	7.07	3920	0.357	50	63.32	36.68	150	0.910
92	01/09/99	7.11	3960	0.374	240	61.08	38.92	150	
93	02/09/99	7.03	3960	0.343		77.24	22.76	150	1.060
94	03/09/99	6.96	4040	0.347	360	60.33	39.67	150	
95	04/09/99	6.99	4000	0.330	480	57.54	42.46	150	0.720
96	05/09/99				340				
97	06/09/99	7.04	3960	0.330	340	54.95	45.05	150	
	No. datos	83	83	83	80	80	83	83	21
	Promedio	7.0	4624.0	0.3	224.6	66.3	36.1	140.6	0.9
	Des. Está.	0.20	620.41	0.06	192.75	9.38	15.49	27.80	0.36

Lourdes Patricia Castro Ortiz
2001

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL DIGESTOR T1

Día	Fecha	pH	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	Alfa	Biogas (mL/d)	Metano (%)	CO ₂ (%)	Alimentación (mL/d)	Bv entrada (gSSV/L·d)
1	02/06/99	7.5	3680	0.42	40	63.19	36.81	300	
2	03/06/99	7.37	4440	0.32	300	62.94	37.06	300	
3	04/06/99	7.51	4000	0.35	100	59.31	40.69	300	
4	05/06/99	7.23	3120	0.42		44.23	55.77	300	
5	06/06/99								
6	07/06/99	7.3	3000	0.41		27.06	72.92	300	2.281
7	08/06/99	7.5	2960	0.45		13.04	86.96	300	
8	09/06/99	7.52	2880	0.45		20.00	80.00	300	0.250
9	10/06/99	7.54	3040	0.43		9.52	90.48	300	
10	11/06/99	7.2	3000	0.4		9.09	90.91	300	2.692
11	12/06/99	7.13	2880	0.41		10.00	90.00	300	
12	13/06/99				35				
13	14/06/99	7.48	4400	0.37	35	60.89	39.11	300	1.625
14	15/06/99	7.15	2880	0.41	10	59.57	40.43	300	
15	16/06/99	7.48	4000	0.38	20	60.19	39.81	275	0.690
16	17/06/99	7.3	3640	0.34		60.22	39.78	300	
17	18/06/99	6.95	3160	0.39	290	59.66	40.34	300	0.739
18	19/06/99	7.23	3200	0.42	300	62.87	37.13	300	
19	20/06/99								
20	21/06/99	7.25	2800	0.47		39.71	60.29	300	0.669
21	22/06/99	7.22	3280	0.47		62.93	37.07	300	
22	23/06/99	7.29	3160	0.45	240	63.69	36.31	300	0.673
23	24/06/99	7.21	2580	0.44	240	63.75	36.25	300	
24	25/06/99	7.29	3200	0.46	200	67.44	32.56	300	0.838
25	26/06/99	6.9	2600	0.41	10	68.00	32.00	300	
26	27/06/99				85				
27	28/06/99	7.31	2920	0.47	85	62.50	37.50	400	1.155
28	29/06/99	7.08	3160	0.46	350	58.15	41.85	400	
29	30/06/99	7.11	3340	0.43		67.26	32.74	400	1.037
30	01/07/99	7.55	3560	0.517		41.18	58.82	300	1.014
31	02/07/99	7.89	3920	0.56		12.50	87.50	300	
32	03/07/99	7.37	3720	0.526			100.00	300	1.136
33	04/07/99								
34	05/07/99	7.49	3760	0.511			100.00	300	
35	06/07/99	7.58	3560	0.483			100.00	300	0.964
36	07/07/99	7.6	4130	0.452	2		100.00	300	
37	08/07/99	7.87	3960	0.505			100.00	300	0.976
38	09/07/99	7.9	4280	0.514			100.00	250	
39	10/07/99	7.69	4000	0.52			100.00	250	0.952
40	11/07/99								
41	12/07/99	7.82	3600	0.488		77.48	22.52	250	
42	13/07/99	7.73	4680	0.470		76.56	23.44	250	1.050
43	14/07/99	7.98	3520	0.568		75.47	24.53	250	
44	15/07/99	7.84	3360	0.523		79.41	20.59	275	1.020
45	16/07/99	7.78	3200	0.537		75.61	24.39	250	
46	17/07/99	7.79	3280	0.512		78.13	21.88	250	1.090
47	18/07/99								

48	19/07/99	7.68	2800	0.514		72.22	27.78	250	
49	20/07/99	7.69	3440	0.511	370	75.97	24.03	250	1.030
50	21/07/99	7.55	3520	0.488	480	72.47	27.53	250	
51	22/07/99	7.60	3560	0.517	950	72.73	27.27	250	
52	23/07/99	7.57	3600	0.500	700	69.62	30.38	250	
53	24/07/99	7.56	3640	0.505	500	70.06	29.94	250	1.006
54	25/07/99				460				
55	26/07/99	7.59	3920	0.480	460	70.24	29.76	250	0.830
56	27/07/99	7.53	3520	0.500	700	69.71	30.29	250	
57	28/07/99	7.61	3680	0.511	810	70.45	29.55	250	0.850
58	29/07/99	7.57	3480	0.529	430	69.65	30.34	250	
59	30/07/99	7.59	3480	0.517	370	68.89	31.11	250	0.510
60	31/07/99	7.62	3320	0.500	470	68.93	31.07	250	
61	01/08/99				280				
62	02/08/99	7.52	3160	0.532	280	68.21	31.79	250	0.800
63	03/08/99	7.48	3320	0.494	470	68.36	31.64	250	
64	04/08/99	7.34	2760	0.580	350	79.65	20.35	250	0.827
65	05/08/99	7.33	2800	0.514	300	63.22	36.78	250	
66	06/08/99	7.39	2920	0.534	290	64.85	35.15	250	0.814
67	07/08/99	7.43	2840	0.521	250	68.71	31.29	250	
68	08/08/99				125				
69	09/08/99	7.30	2960	0.500	125	37.14	62.86	250	0.769
70	10/08/99	7.24	3640	0.440	370	30.56	69.44	250	
71	11/08/99	7.49	4200	0.438	400	11.76	88.24	250	0.894
72	12/08/99	7.51	3080	0.571	200	30.40	69.60	250	
73	13/08/99	7.41	3800	0.474	430	20.93	79.07	250	0.990
74	14/08/99	7.38	3520	0.360	340	33.52	66.48	250	
75	15/08/99				225				
76	16/08/99	7.45	3800	0.484	225	34.08	65.92	250	0.988
77	17/08/99	7.45	3600	0.511	470	34.07	65.93	250	0.976
78	18/08/99	7.29	4160	0.433	400	33.69	66.31	250	
79	19/08/99	7.42	4240	0.472	380	34.07	65.93	250	0.987
80	20/08/99	7.38	4000	0.430	230	34.57	65.43	250	
81	21/08/99	7.26	4240	0.462	260	35.64	64.36	250	1.020
82	22/08/99				300				
83	23/08/99	7.39	4760	0.471	300	34.05	65.95	250	
84	24/08/99	7.43	3840	0.448	120	31.11	68.89	250	0.988
85	25/08/99	7.47	4680	0.427	450	23.53	76.47	250	
86	26/08/99	7.50	3960	0.444	450	32.26	67.74	275	0.942
87	27/08/99	7.39	3960	0.424	850	10.78	89.22	275	
88	28/08/99	7.37	4000	0.570	1000	8.00	92.00	275	0.948
89	29/08/99				500				
90	30/08/99	7.64	3400	0.424	500	34.59	65.41	275	
91	31/08/99	7.61	3640	0.484	1000	28.85	71.15	275	0.932
92	01/09/99	7.63	3480	0.494	640	38.10	61.90	275	
93	02/09/99	7.54	2760	0.493		20.14	79.86	275	0.940
94	03/09/99	7.50	3960	0.454	510	36.68	63.32	275	
95	04/09/99	7.32	3760	0.436	170	36.71	63.29	275	0.940
96	05/09/99				190				
97	06/09/99	7.53	3960	0.485	190	39.05	60.95	275	
	No. datos	83	83	83	61	78	83	83	40
	Promedio	7.46	3531.45	0.47	347.88	49.47	54.70	275.90	1.00
	Desv. Está	0.2	508.6	0.1	236.2	22.0	25.2	33.0	0.4

Lourdes Patricia Castro Ortiz
2001

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL DIGESTOR T2

Día	Fecha	pH	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	Alfa	Biogas (mL/d)	Metano (%)	CO ₂ (%)	Alimentación (mL/d)	Bv entrada (gSSV/L·d)
1	02/06/99	6.93	2440	0.34	38			300	
2	03/06/99	7.03	2480	0.3				300	
3	04/06/99	6.88	3360	0.41		30.77	69.23	300	
4	05/06/99	6.85	2400	0.3		30.77	69.23	300	
5	06/06/99								
6	07/06/99	7	2800	0.3		29.17	70.83	300	2.374
7	08/06/99	7.1	2880	0.31		30.00	70.00	300	
8	09/06/99	7.65	2720	0.38		32.14	67.86	300	2.495
9	10/06/99	7.45	2560	0.45		32.14	67.86	300	
10	11/06/99	7.3	3160	0.46		26.32	73.68	300	2.608
11	12/06/99	7.3	2880	0.44		30.77	69.23	300	
12	13/06/99								
13	14/06/99	7.54	4080	0.4		38.10	61.90	300	2.473
14	15/06/99	6.72	3380	0.3		28.57	71.43	300	
15	16/06/99	7.26	4080	0.35		28.57	71.43	1000	2.380
16	17/06/99	7.23	4000	0.32		22.22	77.78	275	
17	18/06/99	7.06	2800	0.35		19.05	80.95	250	2.170
18	19/06/99	7.47	2600	0.46		18.42	81.58	300	
19	20/06/99								
20	21/06/99	7.4	2800	0.42		17.24	82.76	250	2.139
21	22/06/99	7.49	3800	0.42		21.74	78.26	275	
22	23/06/99	7.6	3360	0.47		21.43	78.57	275	2.880
23	24/06/99	7.61	3000	0.46		18.18	81.82	300	
24	25/06/99	7.64	2880	0.62		23.08	76.92	300	2.681
25	26/06/99	7.06	2440	0.49		26.67	73.33	300	
26	27/06/99								
27	28/06/99	7.4	2760	0.53		27.27	72.73	300	1.921
28	29/06/99	7.33	2560	0.45		30.43	69.57	300	
29	30/06/99	7.23	3360	0.4		33.33	66.67	300	2.328
30	01/07/99	7.48	2440	0.475			100.00	300	2.477
31	02/07/99	7.66	2360	0.356		90.76	9.24	300	
32	03/07/99	7.3	2720	0.426	35	80.15	19.85	300	2.539
33	04/07/99				50				
34	05/07/99	7.09	1800	0.466	50	58.08	41.92	300	
35	06/07/99	7.19	2360	0.39	110	45.45	54.55	300	2.606
36	07/07/99	7.09	2880	0.333	48	63.85	36.15	300	
37	08/07/99	7.41	2640	0.394	2	33.33	66.67	300	2.360
38	09/07/99	7.4	3280	0.39	2	62.86	37.14	250	
39	10/07/99	7.21	3120	0.32	250	60.34	39.66	250	2.210
40	11/07/99								
41	12/07/99	7.40	2480	0.354	5	62.92	37.08	250	
42	13/07/99	7.23	2400	0.366	440	61.39	38.61	250	1.190
43	14/07/99	6.97	2520	0.333	520	64.52	35.48	250	
44	15/07/99	7.23	2320	0.344	50	66.43	33.57	250	1.426
45	16/07/99	6.93	2040	0.372	150	72.97	27.03	250	
46	17/07/99	7.07	2240	0.321	70	68.15	31.85	250	1.140
47	18/07/99				100				

48	19/07/99	7.02	2200	0.327	100	77.42	22.58	250	
49	20/07/99	7.17	2440	0.360	50	64.29	35.71	250	1 319
50	21/07/99	7.16	2360	0.339		81.82	18.18	250	
51	22/07/99	7.21	2360	0.339	970	62.80	37.20	250	
52	23/07/99	7.15	2400	0.350	510	63.69	36.31	250	
53	24/07/99	7.20	2240	0.375	600	62.18	37.82	250	0 446
54	25/07/99				75				
55	26/07/99	7.37	2240	0.393	75	66.00	34.00	250	0 377
56	27/07/99	7.61	3400	0.494		55.56	44.44	250	
57	28/07/99	7.14	2240	0.429	620	67.86	32.14	250	1 621
58	29/07/99	7.26	2200	0.382	5	79.25	20.75	250	
59	30/07/99	6.94	2280	0.368		84.07	15.93	250	1 641
60	31/07/99	6.90	2080	0.366	570	55.87	44.13	250	
61	01/08/99				400				
62	02/08/99	6.97	2160	0.352	400	56.14	43.86	250	1 091
63	03/08/99	6.85	2040	0.353	580	86.96	13.04	250	
64	04/08/99	7.04	1880	0.362	980	59.66	40.34	250	1 585
65	05/08/99	6.99	2200	0.327	740	57.40	42.60	250	
66	06/08/99	7.01	2120	0.226	370	86.73	13.27	250	1 676
67	07/08/99	6.91	2080	0.346	800	56.32	43.68	250	
68	08/08/99				50				
69	09/08/99	6.97	1840	0.413	50	57.14	42.86	250	1 624
70	10/08/99	6.78	2000	0.300	750	57.79	42.21	250	
71	11/08/99	6.96	1880	0.574	1000	62.73	37.27	250	1 217
72	12/08/99	7.04	1640	0.487	850	61.02	38.98	250	
73	13/08/99	6.89	1840	0.370	720	78.18	21.82	250	1 160
74	14/08/99	6.89	1800	0.422	540	60.11	39.89	250	
75	15/08/99				475				
76	16/08/99	6.97	2040	0.353	475	61.33	38.67	250	1 450
77	17/08/99	7.26	1920	0.417	1000	65.71	34.29	250	1 550
78	18/08/99	6.93	2040	0.412	620	58.96	41.04	250	
79	19/08/99	6.90	2080	0.346	790	55.87	44.13	250	1 530
80	20/08/99	6.94	2080	0.365	650	56.35	43.65	250	
81	21/08/99	6.83	2000	0.400	620	70.19	29.81	250	1 710
82	22/08/99				55				
83	23/08/99	6.94	2160	0.352	55	71.21	28.79	250	
84	24/08/99	7.10	2200	0.382	560	68.83	31.17	250	1 780
85	25/08/99	7.23	2320	0.379	20	77.78	22.22	250	
86	26/08/99	6.99	2240	0.357	20	68.29	31.71	275	1 820
87	27/08/99	7.03	2280	0.316	570	68.47	31.53	275	
88	28/08/99	6.82	2720	0.309	40	64.00	36.00	275	1 520
89	29/08/99				115				
90	30/08/99	7.03	2160	0.463	115	60.80	39.20	275	
91	31/08/99	7.20	2640	0.394	70	75.68	24.32	275	1 770
92	01/09/99	7.17	2680	0.388	40	62.01	37.99	275	
93	02/09/99	7.10	2640	0.348		69.44	30.56	275	1 977
94	03/09/99	7.05	2800	0.357	30	68.57	31.43	275	
95	04/09/99	7.15	2800	0.371	50	69.94	30.06	275	1 949
96	05/09/99				250				
97	06/09/99	7.14	2920	0.356	250	75.23	24.77	275	
	No. datos	83	83	83	60	80	80	83	40
	promedio	7.15	2527.71	0.38	332.18	54.72	45.96	278.61	1.83
	Desv. Está	0.23	530.35	0.06	317.72	20.05	20.83	83.20	0.59

Lourdes Patricia Castro Ortiz
2001

CONCENTRACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES (AGV'S) PRESENTES EN EL LODO DEL DIGESTOR M1

Día	Fecha	Ent. Acético (mg/L)	Sal.Acético (mg/L)	Ent.Propio. (mg/L)	Sal. Propio. (mg/L)	Ent.Butírico (mg/L)	Sal.Butírico (mg/L)
3	04/06/99	112.36	273.84	46.55	269.68	112.36	27.21
6	07/06/99	244.74	294.97	135.55	173.34	44.82	9.68
10	11/06/99	299.68	290.88	184.88	194.35	29.09	11.98
13	14/06/99	155.48	567.43	68.56	619.67	19.66	41.08
15	16/06/99		274.34		188.25		25.63
16	17/06/99	31.15	313.94	77.25	232.38		31.72
17	18/06/99		299.32		224.74		27.40
20	21/06/99	20.00	44.33		59.00		20.00
22	23/06/99	34.74	160.83	11.17	119.48	10.15	7.43
28	29/06/99		184.65		163.58		15.63
29	30/06/99	106.68	205.09	66.77	179.40	9.38	21.55
30	01/07/99		234.48		267.75		24.47
32	03/07/99		281.81		245.14		15.02
35	06/07/99		291.39		251.06		14.17
37	08/07/99		106.73		98.60		
39	10/07/99	52.18	209.30	11.49	137.49		5.60
41	12/07/99	119.59	253.13	43.54	110.29		
42	13/07/99	115.08	252.79	41.80	157.41		
44	15/07/99		103.24		76.49		
46	17/07/99		242.01		153.15		32.22
49	20/07/99		327.21		205.89		30.78
51	22/07/99		90.61		93.43		
53	24/07/99	462.17	205.10	236.11	120.12	80.57	
55	26/07/99	421.18	47.21	221.53	30.27	66.73	
58	29/07/99		69.71				
59	30/07/99		121.01		65.09		
62	02/08/99		182.66		72.77		
64	04/08/99	33.49	48.93				
66	06/08/99	80.82	453.07	25.42	179.41		36.64
69	09/08/99	21.40	264.78	11.75	111.96		37.71
71	11/08/99		113.23		33.93		
73	13/08/99	280.14	382.90	57.58	140.35		49.65
76	16/08/99	73.17	274.82	37.31	130.73		
77	17/08/99	144.22	165.39	77.85			
81	21/08/99		141.49	0.00	77.31		
84	24/08/99		12.03		20.44		
86	26/08/99		132.93		60.24		9.14
88	28/08/99	15.04		12.46			
93	02/09/99	62.96	78.36		29.84		
95	04/09/99	41.99					
	Promedio	133.10	210.42	71.98	151.23	46.60	23.56
	Des. Estánd	129.22	118.74	71.43	108.46	37.10	12.13

CONCENTRACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES (AGV'S) PRESENTES EN EL LODO DEL DIGESTOR M2

Fecha	Ent. Acético	Sal.Acético	Ent.Propio.	Sal. Propio.	Ent.Butírico	Sal.Butírico
04/06/99						
07/06/99	748.16	285.51	788.63	2814.16	135.10	256.27
11/06/99	909.68	189.50	905.45	3942.18	160.31	246.48
14/06/99	988.49	190.14	2859.90	3821.23	174.25	243.59
16/06/99	248.00	198.24	454.33	3381.44	87.00	228.53
17/06/99						
18/06/99	260.33	234.34	445.66	3426.59	81.33	235.49
21/06/99	931.71	351.45	913.13	2965.75	178.79	205.87
23/06/99	1033.73	43.67	1091.67	4350.66	199.10	167.87
29/06/99		555.29		2994.29		210.81
30/06/99	1020.00	762.22	899.79	3106.83	170.41	260.00
01/07/99		1638.98		3707.51		252.14
03/07/99	940.85	1622.21	722.74	3505.82	163.20	263.57
06/07/99						
08/07/99	1074.66	1770.69	1102.36	3757.24	194.30	266.89
10/07/99	1429.38	1680.12	1150.85	3805.14	268.35	303.86
12/07/99		783.17		3394.81		231.22
13/07/99	811.97		717.49		169.00	
15/07/99	586.28	843.52	265.48	5204.13	51.35	480.00
17/07/99	733.08	1094.50	347.00	5137.85	61.45	393.32
20/07/99	770.31	1080.12	480.81	3443.45	59.88	286.42
22/07/99		876.74		2496.29		190.46
24/07/99	1245.04	1396.67	770.22	4188.28	177.64	360.07
26/07/99	992.93	1146.34	749.89	3578.81	161.14	250.26
29/07/99	389.40	549.00	334.99	1736.11	19.07	130.80
30/07/99	680.06	927.76	747.36	3900.14	25.78	257.80
02/08/99	801.93	845.31	746.50	3635.63	31.61	231.10
04/08/99	875.32	484.52	801.33	3028.47	37.36	264.31
06/08/99	1515.71	452.88	1291.14	4952.99	83.56	267.06
09/08/99	1090.19	267.34	981.60	3513.71	61.02	212.66
11/08/99	648.82	151.54	445.33	3708.84	69.49	222.87
13/08/99	641.49	251.92	455.89	3735.27	84.14	317.85
16/08/99	598.51	249.50	508.45	3713.45	109.85	369.55
17/08/99	742.74	261.90	507.74	4010.06	94.73	295.01
21/08/99	746.95		450.53		92.54	
24/08/99	709.42	364.07	449.94	4384.81	95.16	452.35
26/08/99	1084.89	357.76	376.76	3046.40	103.39	285.26
28/08/99		168.48		3103.22		243.06
02/09/99	1336.27	567.91	612.78	3313.79	169.49	270.55
04/09/99	644.93	566.38	419.66	2915.81	102.34	224.35
promedio	850.98	663.13	743.61	3592.03	114.75	267.93
Desv. Estánd	297.41	497.28	469.84	701.94	60.86	71.84

Lourdes Patricia Castro Ortiz
2001

CONCENTRACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES (AGV'S) PRESENTES EN EL LODO DEL DIGESTOR T1

Fecha	Ent. Acético	Sal. Acético	Ent. Propio.	Sal. Propio.	Ent. Butírico	Sal. Butírico
04/06/99	112.36	1443.08	46.55	490.60	112.36	23.08
07/06/99	244.74	493.76	135.55	453.69	44.82	29.08
11/06/99	299.68	563.03	184.88	498.43	29.09	26.80
14/06/99	155.48	204.14	68.56	92.33	19.66	101.66
16/06/99		149.33		266.00		16.33
17/06/99	31.15	501.03	77.26	556.53		31.12
18/06/99		366.29		489.18		19.02
21/06/99	20.00	313.99	10.00	441.44		69.07
23/06/99	34.74	272.80	11.17	1921.55	10.15	16.92
29/06/99		256.75		731.68		20.40
30/06/99	106.68	259.14	66.77	695.41	9.38	10.06
01/07/99		327.09		1355.30		132.05
03/07/99		337.87		1252.93		113.40
06/07/99		360.91		1598.84		112.04
08/07/99		354.86		1707.54		106.62
10/07/99	52.18	425.38	11.49	1475.01		65.61
12/07/99	119.59		43.54			
13/07/99	115.08	390.86	41.80	600.75		56.60
15/07/99		349.29		675.44		44.78
17/07/99		336.03		488.83		38.30
20/07/99		522.81		998.42		39.65
22/07/99		267.62		737.41		42.01
24/07/99	462.17	438.48	236.11	1221.38	80.57	82.85
26/07/99	421.18	352.00	221.53	1064.07	66.73	80.16
29/07/99		138.45		498.57		34.81
30/07/99		293.44		1228.25		64.45
02/08/99		303.35		1041.30		69.68
04/08/99	33.49	282.64		929.11		33.05
06/08/99	80.82	472.71	25.42	1207.18		132.97
09/08/99	21.40	395.05	11.75	825.00		42.36
11/08/99	0.00	181.13		942.75		53.38
13/08/99	280.14	371.29	57.58	670.34		59.05
16/08/99	73.17	352.13	37.31	1149.83		56.00
17/08/99	144.22	174.22	77.85	1004.79		66.47
21/08/99		320.99		1341.62		65.53
24/08/99		191.47		574.80		51.52
26/08/99		125.15		607.09		7.83
28/08/99	15.04	248.72	12.46	628.69		50.47
02/09/99	62.96	362.33		832.09		32.08
04/09/99	41.99					
promedio	127.32	355.25	72.50	876.16	46.60	55.19
Des. Estánd.	129.26	210.54	70.91	416.95	37.10	33.26

Lourdes Patricia Castro Ortiz
2001

CONCENTRACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES (AGV'S) PRESENTES EN EL LODO DEL DIGESTOR T2

Fecha	Ent. Acético (mg/L)	Sal.Acético (mg/L)	Ent.Propio. (mg/L)	Sal. Propio. (mg/L)	Ent.Butírico (mg/L)	Sal.Butírico (mg/L)
04/06/99	112.36	1100.77	46.55	1082.90	112.36	95.89
07/06/99	244.74	927.44	135.55	640.47	44.82	76.93
11/06/99	299.68	567.43	184.88	619.03	29.09	41.08
14/06/99	204.14	304.89	92.33	694.32	101.66	40.21
16/06/99	248.00	67.33	454.33	307.33	87.00	14.00
17/06/99	501.03	311.78	556.53	452.10	31.12	39.75
18/06/99	366.29	379.48	489.18	580.84	19.02	18.36
21/06/99	241.33	239.36	433.00	314.22	88.00	16.25
23/06/99	1033.73	191.72	1091.67	377.64	199.10	18.95
29/06/99		378.19		576.34		15.63
30/06/99	1020.00	393.56	899.79	603.68	170.41	7.63
01/07/99		570.84		1067.33		106.13
03/07/99	940.85	430.50	722.74	918.90	163.20	101.08
06/07/99						
08/07/99	1074.66	654.48	1102.36	1273.45	194.30	126.14
10/07/99	1429.38	628.27	1150.85	1179.23	268.35	123.50
12/07/99						
13/07/99	811.97	958.68	717.49	1040.40	169.00	138.92
15/07/99	586.28	963.65	265.48	1967.69	51.35	200.00
17/07/99	733.08	726.67	347.00	1384.67	61.45	159.00
20/07/99	770.31	764.73	480.81	1251.06	59.88	94.00
22/07/99		489.24		979.83		70.37
24/07/99	1245.04	733.39	770.22	1533.81	177.64	128.09
26/07/99	992.93	506.90	749.89	1368.23	161.14	93.27
29/07/99	389.40	140.23	334.99	622.95	19.07	54.21
30/07/99	680.06	443.73	747.36	1424.27	25.78	82.69
02/08/99	801.93	600.62	746.50	1228.29	31.61	106.44
04/08/99	875.32	448.79	801.33	1165.00	37.36	100.64
06/08/99	1515.71	612.38	1291.14	1341.96	83.56	92.00
09/08/99	1090.19	396.73	981.60	1002.95	61.02	84.41
11/08/99	648.82	274.41	445.33	1024.18	69.49	72.41
13/08/99	641.49	422.28	455.89	926.32	84.14	110.62
16/08/99	598.51	375.47	508.45	1321.33	109.85	128.00
17/08/99	742.74	275.75	507.74	1241.93	94.73	93.49
21/08/99	746.95		450.53		92.54	
24/08/99	709.42	630.92	449.94	608.22	95.16	67.70
26/08/99	1084.89	425.89	376.76	788.76	103.39	52.60
28/08/99		752.15		918.43		84.08
02/09/99	1336.27	630.68	612.78	1416.13	169.49	139.56
04/09/99	644.93	406.18	419.66	899.05	102.34	71.34
promedio	745.95	516.91	582.96	976.84	99.07	82.85
Des. Estánd.	362.78	239.04	307.95	382.50	61.42	44.73

HUEVOS DE HELMINTO ENCONTRADOS EN EL LODO BIOLÓGICO DE ALIMENTACIÓN
(Número por g de ST)

Ascaris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	93	71	22	76.34	23.66
28/07/99	87	52	35	59.77	40.23
30/07/99	50	38	12	76	24
02/08/99	23	17	6	73.91	26.09
04/08/99	224	70	154	31.25	68.75
06/08/99	51	39	12	76.47	23.53
09/08/99	48	8	40	16.66	83.34
Promedio	16.45	8.42	8.02	58.63	41.37
Desv. Estánd.	66.25	25.43	49.24	22.93	22.93

Trichiuris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	3	0	3	0	100
28/07/99	6	0	6	0	100
30/07/99	2	0	2	0	100
02/08/99	0	0	0	0	0
04/08/99	28	0	28	0	100
06/08/99	0	0	0	0	0
09/08/99	3	0	3	0	100
Promedio	1.2	0	1.2	0	71.43
Desv. Estánd.	9.92	0	9.92	0.00	48.80

Toxocara sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	12	7	5	58.33	41.67
28/07/99	6	1	5	1.66	83.34
30/07/99	0	0	0	0	0
02/08/99	4	2	2	50	50
04/08/99	2	0	2	0	100
06/08/99	0	0	0	0	0
09/08/99	1	0	1	0	100
Promedio	0.71	1.28	1.42	15.71	53.57
Desv. Estánd.	4.12	2.38	1.98	24.43	39.81

CONTINUACIÓN ...

Hymenolepis sp					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	25	0	25	0	100
28/07/99	12	0	12	0	100
30/07/99	17	0	17	0	100
02/08/99	9	0	9	0	100
04/08/99	5	0	5	0	100
06/08/99	0	0	0	0	0
09/08/99	3	0	3	0	100
Promedio	2.02	0.00	2.02	0.00	85.71
Desv. Estánd.	8.54	0.00	8.54	0.00	34.99

HUEVOS DE HELMINTO ENCONTRADOS EN EL LODO FÍSICOQUÍMICO DE ALIMENTACIÓN
(Número por g de ST)

Ascaris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	306	196	110	64.05	35.95
28/07/99	16	9	7	56.25	43.75
30/07/99	105	85	20	80.95	19.05
02/08/99	49	25	22	55.1	44.9
04/08/99	113	88	25	77.87	22.13
06/08/99	440	345	95	78.4	21.6
09/08/99	127	93	34	73.22	26.78
Promedio	33.02	24.02	8.94	69.41	30.59
Desv. Estánd.	148.41	112.64	39.57	10.05	10.05

Trichuris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	12	0	12	0	100
28/07/99	2	0	2	0	100
30/07/99	5	0	5	0	100
02/08/99	2	0	2	0	100
04/08/99	10	0	10	0	100
06/08/99	27	0	27	0	100
09/08/99	14	0	14	0	100
Promedio	2.05	0.00	2.05	0.00	100.00
Desv. Estánd.	8.63	0.00	8.63	0.00	0.00

CONTINUACIÓN

Toxocara sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	4	3	1	75	25
28/07/99	0	0	0	0	0
30/07/99	4	0	4	0	100
02/08/99	3	3	0	100	0
04/08/99	2	1	1	50	50
06/08/99	18	13	5	72.22	27.78
09/08/99	3	2	1	66.66	33.34
Promedio	0.97	0.62	0.34	51.98	33.73
Desv. Estánd.	5.68	4.28	1.89	35.59	31.72

Hymenolepis sp					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	6	0	6	0	100
28/07/99	1	0	1	0	100
30/07/99	3	0	3	0	100
02/08/99	4	0	4	0	100
04/08/99	5	0	5	0	100
06/08/99	12	0	12	0	100
09/08/99	8	0	8	0	100
Promedio	1.11	0.00	1.11	0.00	100.00
Desv. Estánd.	3.69	0.00	3.69	0.00	0.00

HUEVOS DE HELMINTO ENCONTRADOS EN EL DIGESTOR M1
(Número por g de ST)

Ascaris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	15	3	12	20	80
28/07/99	38	2	36	5.26	94.74
30/07/99	19	2	17	10.52	89.48
02/08/99	105	28	77	26.66	73.34
04/08/99	75	18	57	24	76
06/08/99	140	33	107	23.57	76.43
09/08/99	17	4	13	23.52	76.48
Promedio	11.68	2.57	9.11	19.08	80.92
Desv. Estánd.	48.67	12.90	36.18	7.43	7.43

CONTINUACIÓN ...

Hymenolepis sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	0	0	0	0	0
28/07/99	1	0	1	0	100
30/07/99	0	0	0	0	0
02/08/99	0	0	0	0	0
04/08/99	2	0	2	0	100
06/08/99	0	0	0	0	0
09/08/99	1	0	1	0	100
Promedio	0.11	0.00	0.11	0.00	42.86
Desv. Estánd.	0.75	0.00	0.75	0.00	49.49

Trichuris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	0	0	0	0	0
28/07/99	1	0	1	0	100
30/07/99	5	0	5	0	100
02/08/99	7	0	7	0	100
04/08/99	1	0	1	0	100
06/08/99	20	0	20	0	100
09/08/99	1	0	1	0	100
Promedio	1	0	1	0	85.71
Desv. Estánd.	6.72	0.00	6.72	0.00	34.99

Toxocara sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	3	0	3	0	100
28/07/99	1	0	1	0	100
30/07/99	5	0	5	0	100
02/08/99	7	0	7	0	100
04/08/99	1	0	1	0	100
06/08/99	0	0	0	0	0
09/08/99	0	0	0	0	0
Promedio	0.48	0.00	0.48	0.00	71.43
Desv. Estánd.	2.59	0.00	2.59	0.00	45.18

HUEVOS DE HELMINTO ENCONTRADOS EN EL DIGESTIVO M2
(número por g de ST)

Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	17.2	0.6	16.6	4.48	96.52

Trichuris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
11/01/00	1.4	0	1.4	0	100

Toxocara sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	0	0	0	0	0

Hymenolepis sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	0.4	0	0.4	0	100

HUEVOS DE HELMINTO ENCONTRADOS EN EL DIGESTOR T1
(Número por g de ST)

Ascaris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viabiles	% No viabiles
26/07/99	3	0	3	0	100
28/07/99	11	0	11	0	100
30/07/99	77	2	75	2.59	97.41
02/08/99	33	3	30	9.09	90.91
04/08/99	19	0	19	0	100
06/08/99	17	1	16	5.88	94.12
09/08/99	9	1	8	11.11	88.89
Promedio	4.82	0.20	4.62	4.10	95.90
Desv. Estánd.	24.28	1.11	23.56	4.31	4.31

Toxocara sp					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viabiles	% No viabiles
26/07/99	0	0	0	0	0
28/07/99	0	0	0	0	0
30/07/99	1	0	1	0	100
02/08/99	5	1	4	20	80
04/08/99	1	0	1	0	100
06/08/99	0	0	0	0	0
09/08/99	0	0	0	0	0
Promedio	0.2	0.02	0.17	2.86	40
Desv. Estánd.	1.71	0.35	1.38	7.00	46.60

Trichuris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viabiles	% No viabiles
26/07/99	1	0	1	0	100
28/07/99	3	0	3	0	100
30/07/99	5	0	5	0	100
02/08/99	21	1	20	4.76	95.24
04/08/99	1	0	1	0	100
06/08/99	11	0	11	0	100
09/08/99	4	0	4	0	100
Promedio	1.31	0.02	1.28	0.68	99.32
Desv. Estánd.	6.93	0.35	6.62	1.67	1.67

CONTINUACIÓN...

Hymenolepis sp					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viabiles	% No viabiles
26/07/99	0	0	0	0	0
28/07/99	0	0	0	0	0
30/07/99	4	0	4	0	100
02/08/99	0	0	0	0	0
04/08/99	0	0	0	0	0
06/08/99	0	0	0	0	0
09/08/99	0	0	0	0	0
Promedio	0.11	0.00	0.11	0.00	14.29
Desv. estánd.	1.41	0.00	1.41	0.00	34.99

HUEVOS DE HELMINTO ENCONTRADOS EN EL DIGESTOR T2
(Número por g de ST)

Ascaris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viabiles	% No viabiles
26/07/99	6	0	6	0	100
28/07/99	5	0	5	0	100
30/07/99	55	1	54	1.81	98.19
02/08/99	129	6	123	4.65	95.35
04/08/99	61	1	60	1.63	98.37
06/08/99	446	3	443	0.67	99.33
09/08/99	31	1	30	3.22	96.78
Promedio	20.94	0.34	20.60	1.71	98.29
Desv. Estánd.	147.70	2.04	146.64	1.60	1.60

Trichuris sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viabiles	% No viabiles
26/07/99	1	0	1	0	100
28/07/99	2	0	2	0	100
30/07/99	9	0	9	0	100
02/08/99	9	0	9	0	100
04/08/99	4	0	4	0	100
06/08/99	21	0	21	0	100
09/08/99	10	0	10	0	100
Promedio	1.6	0	1.6	0	100
Desv. Estánd.	6.67	0.00	6.67	0.00	0.00

CONTINUACIÓN

Toxocara sp.					
Fecha	Total	Larvados	S/Larvar	% Viables	% No viables
26/07/99	0	0	0	0	0
28/07/99	0	0	0	0	0
30/07/99	0	0	0	0	0
02/08/99	3	0	3	0	100
04/08/99	2	0	2	0	100
06/08/99	10	0	10	0	100
09/08/99	2	0	2	0	100
Promedio	0.48	0.00	0.48	0.00	57.14
Desv. Estánd.	3.36	0.00	3.36	0.00	49.49

TABLAS COMPARATIVAS DE VIABILIDAD Y REMOCIÓN DE HUEVOS DE *Ascaris sp.*

	LODO AEROBIO (HH/ g ST)	M1(35°C) (HH/ g ST)	T1(55°C) (HH/ g ST)
Larvados (viables)	8.71	2.57	0.28
Sin larvar	8.0	9.1	4.6
Total	16.4	11.7	4.8
% Viables	51.3	22	5
% No viables	48.7	78	95.8
% Remoción		28.6	70.7

	LODO TPA (HH/ g ST)	M2(35°C) (HH/ g ST)	T2(55°C) (HH/ g ST)
Larvados (viables)	24	3	0.3
Sin larvar	9.0	83	20.6
Total	33	86	20.9
% Viables	72.75	4.48	4
% No viables	27.25	96.52	98.6
% Remoción		N. D.	36.67