



---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**  
Unidad Iztapalapa

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD**

*“Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios”*

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE ESPECIALIZACIÓN EN  
BIOTECNOLOGÍA

**P R E S E N T A :**  
**I.B.I. JOSÉ MIGUEL GUZMÁN LUIS**

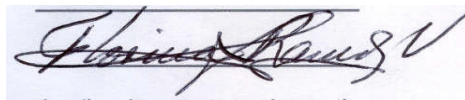
**DIRECTORA: DRA. FLORINA RAMÍREZ VIVES**  
**LECTOR: DR. ÓSCAR A. MONROY HERMOSILLO**

**MÉXICO D.F.**

**14 MAYO DE 2008**

El jurado designado por la **División de Ciencias Biológicas y de la Salud** de la **Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa** aprobó la Tesis: **“Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios”**, que presentó el alumno de la Especialización en Biotecnología IBI. **José Miguel Guzmán Luis**

**Directora de Tesis:**

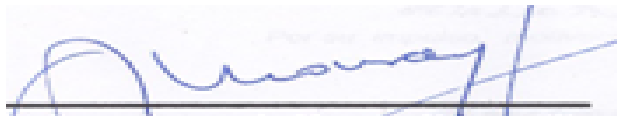


---

**Dra. Florina Ramírez Vives**

Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa

**Lector de Tesis:**



---

**Dr. Oscar Armando Monroy Hermosillo**

Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Autónoma Metropolitana*

*Al Laboratorio de Microbiología Ambiental y Tratamiento de Aguas Residuales*

*A la Dra. Florina Rgmiréz Vives*

*Por la oportunidad que me brindó de ser parte de su grupo de trabajo*

*Al Dr. Oscar A. Menroy Hermosillo*

*Por su asesoría para este proyecto*

*A la Lic. Karla S. Sánchez E.*

*Por su impulso, motivación y apoyo incondicional*

*A mis compañeros de laboratorio*

*Vianey Flores, Itzel Lara, Adriana Hernández, Ulises Durán, Héctor García, Ulises García, Uriel Cid, Lizeth Beristain, Joe Pérez, Jesús Terreros, Patricia Castilla, Lauraceli Romero por brindarme su amistad y apoyo.*

*Al Dr. Carlos y Silvia Guzmán P.*

*Por su apoyo y consejos que siempre me han brindado*

*A mis amigos que han estado conmigo siempre*

*Por que también forman parte de este trabajo*

## DEDICATORIA

*A Dios*

*Por darme salud y bienestar*

*A Miguel Guzmán P. y Ma. Xochitl Luis N.*

*Por su gran ejemplo e inspiración y fortaleza*

*A Silvia, Alexia, Malena y Víctor.*

*Por su apoyo y por ser parte importante en mi vida*

*A Delfina Patraca M.*

*Por todo su amor y cariño*

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ABREVIATURAS	9
RESUMEN	10
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 MARCO TEÓRICO	12
1.1.2 Tecnologías para la estabilización y disposición de lodos	13
1.1.3 Digestión anaerobia	14
1.1.4 Digestión anaerobia mesofílica	15
1.1.5 Digestión anaerobia Termofílica	15
1.1.6 Digestión anaerobia en dos etapas	16
1.2 ANTECEDENTES	17
1.3 JUSTIFICACIÓN	19
1.4 OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES	20
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS	22
2.1.2 Determinación de pH	22
2.1.3 Determinación de DQO total y soluble	23
2.1.4 Determinación de sólidos	24
2.1.5 Determinación de AGV	26
2.1.6 Determinación de biogás	27
2.2 ESTANDARIZACIÓN DE TÉCNICAS ANALÍTICAS	28
2.2.1 Curva estándar para la determinación de DQO <sub>T</sub> Y DQO <sub>S</sub>	28
2.2.2 Curva estándar para la determinación de AGV	29
2.3 MUESTREO DEL LODO RESIDUAL	32
2.4 MUESTREO DE INÓCULOS	32
2.5 CARACTERIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES	33
2.6 CARACTERIZACIÓN DE INÓCULOS	34
2.7 DISEÑO EXPERIMENTAL DE LAS CINÉTICAS EN LOTE	35
2.8 MONTAJE DE LAS CINÉTICAS EN LOTE CON LODO ACIDOGÉNICO Y LODO METANOGÉNICO A 35°C	35
2.9 CINÉTICAS EN LOTE CON MEZCLA DE INÓCULOS A 35°C	36
2.10 MONTAJE Y MONITOREO DEL REACTOR UASB	36
2.11 FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR	37
2.12 PURGA DE LODOS	38
2.13 VELOCIDAD Y EFICIENCIA DE HIDRÓLISIS	38

**CAPITULO 3**  
**RESULTADOS Y DISCUSIONES**

<b>3.1</b>	<b>CINÉTICAS EN LOTE</b>	<b>40</b>
<b>3.2</b>	<b>CINÉTICAS CON EV, LA, LM</b>	<b>40</b>
3.2.1	pH	40
3.2.2	Sólidos suspendidos Volátiles (SSV)	40
3.2.3	Demanda química de Oxígeno total y soluble (DQO <sub>T</sub> y DQO <sub>S</sub> )	41
3.2.4	Ácidos grasos volátiles (AGV)	42
3.2.5	Biogás (CH <sub>4</sub> Y CO <sub>2</sub> )	44
<b>3.3</b>	<b>CINÉTICAS UTILIZANDO UNA MEZCLA INÓCULOS</b>	<b>46</b>
3.3.1	pH, SSV, DQO	46
3.3.2	AGV y biogás (CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> )	47
<b>3.4</b>	<b>HIDRÓLISIS Y ACIDOGÉNESIS EN UN REACTOR UASB</b>	<b>49</b>
3.4.1	Purga de lodos	49
3.4.2	Velocidad y Eficiencia de hidrólisis	50
3.4.3	pH	51
3.4.4	Demanda Química de Oxígeno Soluble	51
3.4.5	Sólidos suspendidos volátiles	52
3.4.6	Ácidos Grasos Volátiles y Producción de Biogás (CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> )	53

**CAPITULO 4**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

<b>4.1</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>56</b>

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>57</b>
---------------------	-----------

<b>ANEXOS</b>	<b>61</b>
---------------	-----------

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

Tabla	1.1	Comparación de la digestión anaerobia mesofílica y termofílica	16
-------	-----	--	----

### CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla	2.1	Preparación de las diferentes concentraciones de la curva patrón	28
Tabla	2.2	Composición de las soluciones patrón por concentración	29
Tabla	2.3	Preparación de las diferentes concentraciones de las curvas patrón de AGV.	29
Tabla	2.4	Ecuaciones y coeficientes $R^2$ para cada recta en la curva estándar (0 - 100 mg/L)	30
Tabla	2.5	Ecuaciones y coeficientes $R^2$ para cada recta en la curva estándar (0 - 2000 mg/L)	31
Tabla	2.6	Concentración de sólidos y DQO de lodos residuales	33
Tabla	2.7	Caracterización de lodo residual diluido y espesado a $8.0 \pm 1.0$ g/L de ST y a pH de 5.	34
Tabla	2.8	Caracterización de inóculos	34
Tabla	2.9	Proporciones de lodos trabajadas durante las cinéticas con lodo acidogénico y lodo metanogénico.	35
Tabla	2.10	Proporciones de lodos trabajadas durante la cinética de mezclas de inóculos	35
Tabla	2.11	Simbología del esquema de diseño de operación del reactor UASB	37
Tabla	2.12	Condiciones iniciales de operación del reactor UASB	37

### CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla	3.1	pH final en las cinéticas en lote	40
Tabla	3.2	Sólidos suspendidos volátiles en las cinéticas en lote	41
Tabla	3.3	DQO total en las cinéticas en lote	41
Tabla	3.4	DQO soluble en las cinéticas en lote	41
Tabla	3.5	Ácidos grasos volátiles en las cinéticas en lote	42
Tabla	3.6	Biogás en las cinéticas en lote	44
Tabla	3.7	Eficiencia de consumo y formación de productos en la cinética de mezclas de inóculos	46
Tabla	3.8	Eficiencia de formación de AGV y composición del biogás en la cinética de mezclas de inóculos	47
Tabla	3.9	Composición de la mezcla de lodo (alimentación)	49
Tabla	3.10	Variación del TRH y TRS en el reactor UASB	49
Tabla	3.11	Velocidad y Eficiencia de hidrólisis en el reactor	50
Tabla	3.12	Eficiencia de los parámetros evaluados en los diferentes tiempos de retención.	51
Tabla	3.13	Eficiencia de formación de AGV y producción de biogás en los diferentes tiempos de retención	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

Figura	1. 1	Etapas de la digestión anaerobia	15
--------	------	----------------------------------	----

### CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Figura	2.1	Determinación de pH.	22
Figura	2.2	Determinación de DQO	23
Figura	2.3	Determinación sólidos	25
Figura	2.4	Determinación de AGV.	26
Figura	2.5	Medición del biogás	27
Figura	2.6	Curva estándar de DQO	28
Figura	2.7	Curva estándar de AGV (0 – 100 mg/L)	30
Figura	2.8	Curva estándar de AGV (0 - 2000 mg/L)	31
Figura	2.9	Planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la estrella”	32
Figura	2.10	Reactores donde se muestrearon los lodos: acidogenico y metanogenico	32
Figura	2.11	Muestras sin y con inoculo	36
Figura	2.12	Incubación de las muestras a 35 °C	36
Figura	2.13	Esquema del reactor UASB	37

### CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Figura	3.1	Producción de AGV en las cinéticas con estiércol de vaca	42
Figura	3.2	Producción total de AGV en las cinéticas con lodo acidogénico	43
Figura	3.3	Producción de AGV en las cinéticas con lodo metanogénico	43
Figura	3.4	Producción de biogás en las cinéticas con estiércol de vaca	44
Figura	3.5	Producción de biogás en las cinéticas con lodo acidogénico	45
Figura	3.6	Producción de biogás en las cinéticas con lodo metanogénico	45
Figura	3.7	Producción de AGV en las cinéticas de mezclas de inóculos.	47
Figura	3.8	Producción de biogás en las cinéticas de mezcla de inóculos	48
Figura	3.9	Velocidad y eficiencia de hidrólisis a cada TRS en el reactor UASB	50
Figura	3.10	Formación de DQO soluble en el reactor acidogénico.	52
Figura	3.11	Remoción de SSV en el reactor acidogénico.	52
Figura	3.12	Formación de AGV en el reactor acidogénico	53
Figura	3.13	Producción de biogás en el reactor acidogénico	54



## ABREVIATURAS

ABS	Absorbancia
AGV	Ácidos grasos volátiles
CNA	Comisión Nacional del Agua
APHA	Asociación Americana de Salud pública
AWWA	Asociación Americana del Agua
°C	Grados centígrados
CaO	Óxido de calcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de calcio
CH <sub>4</sub>	Metano
CLP	Lodo control primario
CLS	Lodo control secundario
CL70/30	Lodo Control relación lodo primario/lodo secundario=70/30
CL50/50	Lodo Control relación lodo primario/lodo secundario=50/50
CL30/70	Lodo Control relación lodo primario/lodo secundario=30/70
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DQO <sub>T</sub>	Demanda química de oxígeno total
DQO <sub>s</sub>	Demanda química de oxígeno soluble
EV	Estiércol de vaca
FID	Detector de ionización de flama
g/L	Gramos por litro
gDQO/Ld	Gramos de demanda química de oxígeno por litro por día
gSSV / Ld	Gramos de sólidos suspendidos volátiles por litro por día
H <sub>2</sub>	Hidrógeno
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrógeno
LA	Lodo acidogénico
LM	Lodo metanogénico
LP	Lodo primario
LP/LS	Relación lodo primario/lodo secundario
LR	Lodo residual
LS	Lodo secundario
LSI	Lodo secundario con inóculo
LPI	Lodo primario con inóculo
L70/30 I	Lodo relación primario/secundario con inóculo = 70/30
L50/50 I	Lodo relación primario/secundario con inóculo = 50/50
L30/70 I	Lodo relación primario/secundario con inóculo = 30/70
m/h	Metros por hora
mA	Mili amperes
mg/L	Miligramos por litro
mL CH <sub>4</sub>	Mililitros de CH <sub>4</sub>
mL CO <sub>2</sub>	Mililitros de CO <sub>2</sub>
mL/min	Mililitros por minuto
mM	Mili moles
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
NaOH	Hidróxido de sodio
N <sub>2</sub>	Nitrógeno molecular
pH	Potencial hidrógeno
RPM	Revoluciones por minuto
R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlación
TCD	Detector de conductividad térmica
TRH	Tiempo de retención hidráulica
TRS	Tiempo de retención de sólidos
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
UASB	Reactor anaerobio de lecho de lodos
µL	Microlitros

**Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México D.F.**  
**José Miguel Guzmán Luis (2008). Tesis de Especialización en Biotecnología.**  
**“Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios”**

El tratamiento de las aguas residuales ha tomado una gran trascendencia para poder satisfacer las necesidades de la industria y la población, ya que de éstas se generan grandes volúmenes de aguas negras. Al tratar las aguas negras se generan los lodos residuales, los cuales normalmente son vertidos sin ningún tratamiento previo al sistema de alcantarillado y corrientes de agua, lo cual representa un problema muy serio de contaminación ambiental por el alto contenido de materia orgánica y la predominancia de compuestos tóxicos. Por tal motivo, es indispensable emplear tecnologías limpias e idóneas que permitan reducir o bio-transformar el poder contaminante de estos compuestos

El objetivo de este trabajo fue probar diferentes fuentes de inóculo mediante cinéticas en lote a 35°C, con el propósito de mejorar la eficiencia de hidrólisis y acidogénesis en la digestión anaerobia de lodos residuales. Posteriormente con el mejor inóculo trabajado se montó y operó un reactor acidogénico UASB a diferentes Tiempos de retención hidráulica.

Las cinéticas en lote se llevaron a cabo en botellas serológicas de 120 mL con un volumen de 80 mL, con una concentración de sólidos totales de 8 g/L a un pH de 5 y se incubaron a 35 °C a 150 RPM. Se probaron cinco diferentes proporciones de lodos (lodo primario (P), lodo secundario (S), relación P/S; 70/30, P/S; 50/50, P/S; 30/70), y los inóculos a evaluar fueron estiércol de Vaca, lodo acidogénico, lodo metanogénico y mezclas de éstos.

En la cinética con estiércol de vaca se observó un aumento en las eficiencias en todas las diferentes proporciones trabajadas, obteniéndose una mayor destrucción de SSV, formación de DQO soluble y AGV en la relación primario/secundario 70/30 de 9.58 %, 11.92 % y 61.30% respectivamente, con una composición de biogás de 25% de CH<sub>4</sub> y 75% de CO<sub>2</sub>.

En lo que se refiere a la cinética con lodo acidogénico se observó un aumento de los parámetros en la misma relación 70/30 con un 19.73% en la destrucción de SSV, un 17.14 % en la formación de DQO soluble y un 88.32% en la de AGV, también se encontró la misma composición en el biogás. En la cinética con lodo metanogénico se vio que el inóculo favoreció las condiciones metanogénicas, que no se deseaban en este estudio, hubo un aumento en el pH y un consumo de AGV y una producción de CH<sub>4</sub> de 65% mayor a la de CO<sub>2</sub> que fue de 35%.

En la mezcla de inóculos se observó la máxima eficiencia de hidrólisis, cuando se combinan el estiércol de vaca y lodo acidogénico en la misma relación 70/30, con eficiencias de destrucción de SSV de 26.71 %, una eficiencia de formación de DQO soluble y de formación de AGV de 21.4% y 88.45% respectivamente, con una composición de biogás de 80 % de CO<sub>2</sub> Y 20 % de CH<sub>4</sub>.

El reactor acidogénico fue operado con una relación LP/LS de 50/50, a 8.0 g/L de ST, a pH de 5 y a diferentes TRH (8, 6, 5, 4, 3 días). Obteniéndose las mejores eficiencias de remoción y formación de productos con un TRH de 4 días y a un TRS de 17 días. Con una eficiencia de remoción de SSV de 58.22%, una velocidad de hidrólisis y eficiencia de ésta, de 0.157 gSSV / Ld y 57.24 % respectivamente y una formación de DQO soluble de 37.58%.

Por lo anterior se puede decir la velocidad de hidrólisis y el TRS juegan un papel importante en el desarrollo de la digestión anaerobia ya que a tiempos largos se favorece la etapa metanogénica y a tiempos cortos, se favorece la hidrólisis y acidogénesis.

# CAPITULO

# 1

# INTRODUCCIÓN

---

*"Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios"*

*J.B.F. José Miguel Guzmán Luis*

### 1.1 MARCO TEÓRICO

Derivado del incremento de la población y a la creación de las numerosas industrias en México, se generan grandes volúmenes de aguas negras como producto final de sus diversos procesos de producción, lo cual representa un problema muy serio de contaminación ambiental por el alto contenido de materia orgánica que conllevan (proteínas, lípidos, carbohidratos), la predominancia de compuestos tóxicos (compuestos organoclorados, surfactantes pesticidas, derivados del petróleo, metales pesados), etc. Por tal motivo, es indispensable emplear tecnologías que permitan reducir o bio-transformar el poder contaminante de estos compuestos de alto riesgo en otros de menor peligrosidad para la ecología.

En el año 2005 en este país existían registradas 1593 plantas de tratamiento de agua residual municipal en operación, con una capacidad instalada de 99 764.19 L/s y un caudal tratado de 74 388.29 L/s (Comisión Nacional del Agua, 2005).

El volumen de aguas residuales industriales generadas es de 258 m<sup>3</sup>/s y de municipales es de 255m<sup>3</sup>/s, de lo anterior solo se trata un 10.6% y 23.05% respectivamente (Comisión Nacional del Agua 2005), generándose aproximadamente 1 tonelada de lodo residual por cada 2.86 X 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> de agua tratada (Torres y Zarate, 1997), el cual normalmente sin ningún tratamiento previo es vertido al sistema de alcantarillado y corrientes de agua.

La producción de biomasa en los reactores biológicos y de lodo primario que llevan las aguas negras representa un serio problema de contaminación ambiental debido a la presencia de compuestos tóxicos y microorganismos patógenos, siendo estos parámetros indicadores para ser tratados adecuadamente. La aplicación directa de lodos en los campos agrícolas sin antes ser sometidos a un proceso de estabilización, representa un riesgo potencial para la sociedad y el estado natural de los cuerpos receptores (Anise y Darwin, 1995)

Actualmente la mayor parte de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas instalados en México, no contemplan el manejo y disposición de los lodos residuales que generan. Esto propicia que los lodos de desecho sean dispuestos en forma cruda o semitratada en tiraderos a cielo abierto, en rellenos sanitarios o en el sistema de alcantarillado, lo que representa un impacto ambiental importante y en varios casos un grave riesgo para la salud pública (Noyola 2005)

Ante tal situación, el Gobierno ha elaborado la Norma Oficial Mexicana que regula la disposición y el reúso de los lodos de desecho generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (NOM-004-SEMARNAT-2002). Para el cumplimiento de dicha normatividad será necesario desarrollar y adaptar la tecnología de tratamiento adecuada.

Los lodos residuales se definen como una mezcla que contiene una fase sólida suspendida en un medio líquido que dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento la fase sólida será entre el 12- 25 % del peso total.

Por su origen se clasifican en lodos primarios los que provienen del tratamiento primario en donde por sedimentación se eliminan partículas con velocidades de hasta 0.1 m/h, aquí se eliminan cerca del 90 a 95 % de sólidos sedimentables y entre el 20 y 40 % de la materia

orgánica y lodos secundarios que provienen de un tratamiento biológico ya sea aerobio o anaerobio.

Los lodos residuales están compuestos de proteínas, lípidos, carbohidratos y ácidos nucleicos. Los carbohidratos presentes están en forma de polisacáridos, que predominantemente son azúcares simples y derivados unidos por enlaces glucosídicos. Las proteínas se dividen en dos grupos generales: proteínas globulares y fibrosas. La mayoría de las grasas en los residuos complejos son ésteres de triglicéridos. Alrededor del 90 % de estos triglicéridos están compuestos de glicerol y ácido mirístico, palmítico, esteárico y oleico. Estos lípidos son insolubles en agua y tienen carácter hidrofóbico.

### 1.1.2 Tecnologías para la estabilización y disposición de lodos:

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado diversos métodos y tecnologías para la disposición y estabilización de lodos residuales, provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales (CNA, 1995), a continuación se mencionan algunas de éstas.

#### a) Espesamiento

Es un proceso que se emplea para aumentar el contenido de sólidos del lodo por eliminación de la porción líquida y puede ser:

- Por gravedad, flotación, centrifugación, filtros de banda y al vacío

#### b) Estabilización Química

Para este proceso se usan medios químicos como el sulfato ferroso, el cloruro férrico, cal, alúmina y polímeros orgánicos.

#### c) Secado

Mediante el secado de los lodos se consigue reducir el peso de éstos.

Es producido generalmente mediante procedimientos basados en contacto, convención o radiación. Tales como:

- Secado al aire y lechos: secado por fluidizado y calentamiento.
- Oxidación húmeda por calentamiento y presión.

#### d) Reducción Térmica

La reducción térmica de los lodos incluye la conversión parcial o total de los sólidos orgánicos a productos finales oxidados, principalmente dióxido de carbono y agua.

- Incineración u oxidación por vía húmeda o la oxidación y volatilización parcial de los sólidos orgánicos.
- Pirólisis o combustión completa para formar productos finales que tienen poder calórico.

#### e) Digestión Anaerobia

Es la degradación de materia orgánica a metano y bióxido de carbono, en ausencia de oxígeno. Esta transformación es llevada a cabo por una variedad de microorganismos, algunos de los cuales dependen unos de otros en relaciones sintróficas (Gujer y Zehnder 1983).

El proceso puede ser la digestión termofílica en la cual el lodo se fermenta en tanques en una temperatura de 55 °C, o mesofílica a una temperatura alrededor de 35°C.

La generación de metano es una ventaja dominante del proceso, Su desventaja es la de requerir un largo plazo (hasta 30 días). Una de las etapas limitantes en este proceso es la formación de ácidos grasos provenientes de la hidrólisis de los carbohidratos y proteínas.

#### f) Oxidación aerobia

Es un proceso bacteriano que ocurre en presencia de oxígeno. Bajo condiciones aerobias, las bacterias consumen la materia orgánica y la convierten en bióxido de carbono y biomasa principalmente. Una vez que hay carencia de materia orgánica, las bacterias mueren y son utilizadas como alimento por otras bacterias (respiración endógena). La reducción de los sólidos ocurre en esta fase. La oxidación aerobia es mucho más rápida que la digestión anaerobia, sin embargo, los gastos de operación son altos debido a los costos energéticos para la aireación del sistema.

### 1.1.3 Digestión anaerobia

A continuación se detallan las etapas del proceso de digestión anaerobia, en la cual un gran número de microorganismos degradan la materia en sucesivas etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Figura 1.1.

- **Hidrólisis.** En esta etapa las macromoléculas como proteínas, lípidos, carbohidratos y ácidos nucleicos son transformados en oligómeros y monómeros (ácidos grasos, carbohidratos, aminoácidos, bases púricas), principalmente. Estos polímeros complejos son hidrolizados en monómeros solubles debido a la producción de enzimas como celulasas, amilasas, proteasas y lipasas. La disminución de los valores de alcalinidad y pH afectan el metabolismo bacteriano, que hidroliza los sustratos orgánicos complejos, debido a la pérdida de las enzimas y a la disminución de la actividad enzimática, además que se induce, a bajas variaciones de pH, una significativa hidrólisis ácida de estas bacterias, siendo ésta la etapa limitante en la digestión anaerobia de lodos.
- **Acidogénesis,** en esta etapa el valor de pH de los lodos disminuye pasando de valores de 7.0 a valores de 5.0. Las bacterias fermentan los productos solubles de la hidrólisis, principalmente en H<sub>2</sub> y ácidos grasos volátiles (AGV). En conjunto las bacterias hidrolíticas y acidogénicas convierten los sustratos complejos a precursores de la metanogénesis: H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y acetato.

En este paso intervienen reacciones que permiten que los productos de hidrólisis sean fermentados por un grupo complementario de bacterias fermentativas.

- **Acetogénesis,** En esta etapa participan una gran variedad de organismos anaerobios y facultativos. Durante esta etapa los ácidos grasos volátiles, de manera simultánea que los compuestos nitrogenados, son oxidados y transformados lentamente. Aquí el valor de pH aumenta de 5.0 hasta alrededor de 6.8.
- **Metanogénesis,** En la última etapa de la digestión anaerobia el contenido de ácidos grasos volátiles disminuye considerablemente. El valor de pH aumenta de 6.8 hasta 7.4,

---

*"Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios"*

*J.B.J. José Miguel Guzmán Luis*

produciéndose grandes volúmenes de gases con un 65 a 70% de CH<sub>4</sub> y 35 a 30% de CO<sub>2</sub> y otros gases como el N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.

La eficiencia del proceso de digestión anaerobia, puede evaluarse en base a la destrucción de la materia orgánica: de sólidos suspendidos volátiles, demanda química de oxígeno (SSV y DQO), volumen y composición de los gases que se producen, utilizando como controladores el aumento en la concentración de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, acumulación de AGV o el consumo de la alcalinidad del bicarbonato (Iza, 1989).

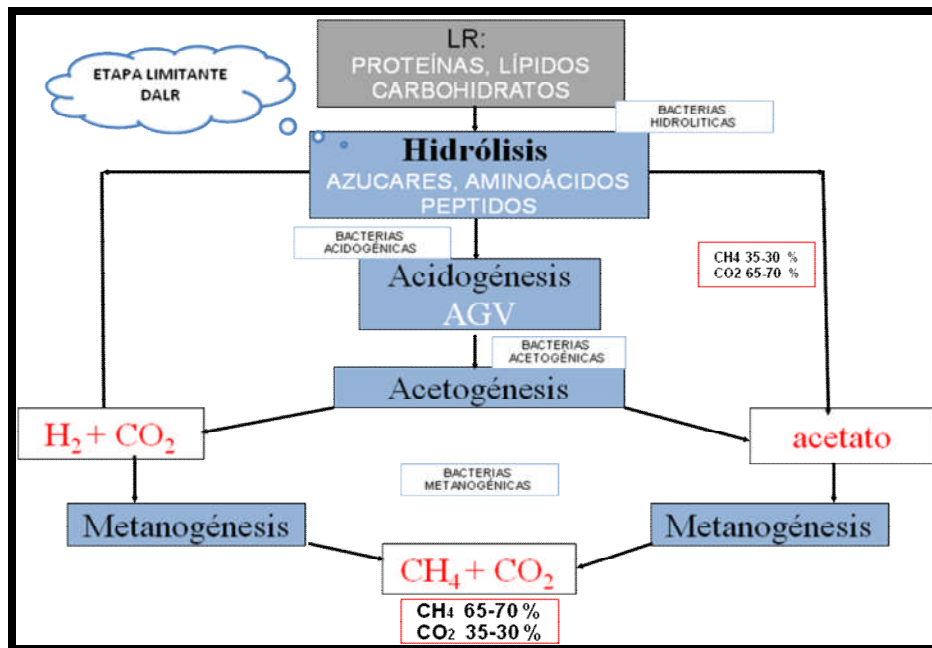


Figura 1.1 Etapas de la digestión anaerobia. (Monsey 1981)

#### 1.1.4 Digestión anaerobia mesofílica

Estos sistemas son los más difundidos, pero los tiempos de retención hidráulica (TRH) son mayores a 10 días, lo que en muchas ocasiones hace que la eficiencia de remoción sea mayor al 50%. En este proceso no hay reducción o eliminación de agentes patógenos. En la tabla 1.1.4.1 se muestra una comparación de la digestión anaerobia mesofílica y termofílica.

#### 1.1.5 Digestión anaerobia termofílica

En este proceso se observa una disminución en el tiempo de retención hidráulica, destrucción de patógenos, reducción de la viscosidad de los lodos y los bajos volúmenes de residuos generados por la digestión termofílica, sin embargo presenta el problema de una baja remoción de AGV lo que produce malos olores, además de menores eficiencias de remoción de proteínas y lípidos.

**Tabla 1.1** Comparación de la digestión anaerobia mesofílica y termofílica

<b>Digestión Anaerobia</b>	
<b>Mesofílica</b>	<b>Termofílica</b>
T= 35 °C	T= 55°C
TRS >20 d	TRS< 20 d
< Eficiencia de reducción de SV y en desactivación de patógenos	> empleando altas tasas metabólicas de los microorganismos (Aukiand, Kawase, 1991; Zabranska, 2000)
Buena deshidratabilidad del efluente	Pobre deshidratabilidad
No necesita energía adicional	Requiere energía adicional para calentar el digestor (Kim, 2002)
Poco sensible a cambios en las condiciones de operación	Mas sensible a cambios de las condiciones de operación (Temperatura ambiente, Velocidad de carga orgánica y características del fango de alimentación). (Van Lier, 1996)

### 1.1.6 Digestión anaerobia en dos etapas

Dado que la etapa limitante en la digestión anaerobia en lodos residuales es la hidrólisis de las macromoléculas, resulta ventajosa separarla en dos etapas, la acidogénesis en un primer reactor y la acetogénesis y metanogénesis en otro y poder controlar mejor el proceso. La digestión en dos etapas tiene la intención de ganar en estabilidad evitando sobrecargas de AGV para las bacterias metanogénicas ante variaciones de carga orgánica. Además, acelera la velocidad de hidrólisis promoviendo la formación de compuestos precursores de la metanogénesis.



## 1.2 ANTECEDENTES

La limitante principal en el tratamiento de residuos sólidos es la baja disponibilidad de materiales solubles. Los sólidos suspendidos en los lodos residuales, son principalmente microorganismos que pueden considerarse como el sustrato de difícil degradación y al mismo tiempo el inóculo del proceso. Por ello, uno de los procesos de estabilización más común para el lodo, es la estabilización alcalina, la cual se logra adicionando suficiente cal viva (óxido de calcio CaO), o bien la cal hidratada (hidróxido de calcio, Ca(OH)<sub>2</sub>). Sin embargo, la alcalinización no permite tener un lodo completamente estabilizado y libre de microorganismos patógenos.

Actualmente como ya se mencionó, se han desarrollado diversas tecnologías para estabilizar el lodo, entre las cuales se encuentra la oxidación aerobia, la digestión anaerobia, el composteo y las lagunas de estabilización. De acuerdo a dichas investigaciones realizadas se piensa que la digestión anaerobia es una buena alternativa de estabilización de lodos residuales, para su posterior uso en suelos, como reportan diversos autores.

Eastman y Ferguson (1981), reportan que el paso limitante en la digestión anaerobia de sólidos es la hidrólisis. Estudiaron la capacidad de hidrólisis de materia orgánica particulada durante la fase ácida de la digestión anaerobia, utilizando cuatro reactores de mezcla completa operados a flujo continuo y discontinuo con tiempos de retención de sólidos e hidráulico (TRS, TRH) de 9 a 72 h, alimentados con fangos primarios con una concentración de sólidos en suspensión de 3,6%. Se determinó que los incrementos del TRS de 9 a 72 h provocan aumentos en la producción de AGV del reactor.

Elefsiniotis y Oldham (1991), analizaron los efectos del tiempo de retención hidráulico (TRH) y el tiempo de retención de sólidos (TRS) sobre la producción de los AGV a partir de fangos primarios (4000 mg ST/L), obteniendo la mayor tasa de producción (0,102 mg AGV/mg SSV) con 12 h, y con un TRS constante igual a 10 d. En este estudio se determinó que al trabajar con TRH superior a las 12 h, produce una activación de la fase metanogénica, lo que provoca un descenso en la producción de AGV.

Tanaka y col (1992). Realizaron la digestión anaerobia con pretratamiento termoquímico a 130 °C con 0.3 g NaOH / g SSV, obteniendo una formación del DQO soluble que va del 10 al 50 % y una eficiencia de remoción de SSV del 45%.

Tsakou y col (2000) realizaron un sistema acidogénico-termofílico a 56°C sin pretratamiento obteniendo una eficiencia de destrucción SSV de 27%, un incremento en la producción de metano de 60%, una eficiencia de DQO soluble de 27 % y una eficiencia de formación de AGV de 53.3%.

Campos (2001), estudió la co-digestión anaerobia de estiércol de cerdo con distintos co-sustratos orgánicos (lodos metanogénicos), en sistemas de mezcla completa, obteniendo resultados positivos tanto en régimen mesofílico como termofílico, y señaló que la principal ventaja de la co-digestión está en aprovechar la sinergia de la mezcla y compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado.

Milenko (2002) Trabajó la estabilización y degradación de lodos residuales por medio de la digestión aerobia termofílica, en la primera parte del experimento trabajaron con diferentes temperaturas desde 20 °C hasta 55 °C, encontrando mejores resultados a 50 °C, obteniendo

una remoción de sólidos suspendidos volátiles del 29.7% a un TRH de 5 días, y un 48.2% con un TRH de 10 días.

Shana y Assadi (2002) utilizaron un sistema acidogénico-mesofílico semicontinuo a 35°C sin pretratamiento obteniendo en el reactor acidogénico una eficiencia de destrucción de SSV de 14%, una eficiencia de formación de DQOs de 29 % y una eficiencia de formación de AGV de 73%, y un 44.7 % de destrucción de SSV en el reactor termofílico.

Vigueras (2002) comparó la eficiencia de remoción de sólidos en lodos residuales (LR) pretratados químicamente utilizando la digestión anaerobia en una y en dos etapas. El sistema en una etapa constó de un reactor de mezcla completa y el de dos etapas de un sedimentador y un reactor UASB alimentándolos con diferentes tipos de lodos, combinados (doméstico, comercial e industrial). El pretratamiento de LR con NaOH (0.5gNaOH/g SSV) redujo hasta un 18% de SSV sin embargo cuando se alimentaron en el reactor en lote no aumentó la producción de metano. El estudio en una etapa mostró que cuando se alimentó con LR combinado y pretratado (CCP) la velocidad de hidrólisis disminuye 0.1 g SSV/Ld con respecto al sistema con LR domésticos sin pretratamiento (DSP). El sistema en dos etapas alimentado con LR doméstico pretratado (DCP) logró una velocidad de hidrólisis de hasta 0.1 g SSV/Ld mas altos que el sistema DCP. La velocidad de remoción para los sistemas de una etapa con LR CCP y el alimentado con LR DSP fue de 0.5gDQO/Ld y 0.1 gDQO/Ld respectivamente, y para el sistema en dos etapas fue de 0.44 gDQO/Ld. En general el sistema en dos etapas presentó mayor remoción de sólidos con un 43% comparado con 27% y 14% para los sistemas de una etapa con y sin pretratamiento.

Cabirol y col (2005) operó un sistema de digestión anaerobia en dos fases termofílico/mesofílico a TRH de 3 y 13 días respectivamente; el cual fue alimentado con lodo secundario. El principal objetivo del estudio fue corroborar la producción de biosólidos clase A, asociada a una operación adecuada del sistema. La reducción de sólidos volátiles (%RSV) global fue de 34% y se logró la eliminación de coliformes fecales a valores que cumplen con lo especificado por la *NOM-004-SEMARNAT-2002* (<1000 NMP/g ST); cuando se trabajó con altas temperaturas.

Ağdağ & Sponza (2005), en su estudio de co-digestión de lodo industrial con la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, señalan que dentro de los beneficios de la co-digestión anaeróbica se incluyen: la dilución de los componentes tóxicos, mejora el balance de nutrientes, se genera un efecto sinérgico de los microorganismos, aumenta la carga de materia orgánica biodegradable, mejora la producción de biogás y aumenta la velocidad de digestión.

Sabando y del castillo (2006) estudiaron la co-digestión de lodos de piscicultura utilizando estiércol de vaca como inóculo y encontraron una eficiencia de solubilización del 59-70 %, y una remoción de demanda química de oxígeno total (DQO<sub>T</sub>) del 11 al 79 %, estos rangos son de las diferentes proporciones utilizadas, siendo la mejor la relación lodo/estiércol de 50/50.

Terreros (2007). Estudió la estabilización de lodos por digestión anaerobia en dos etapas en reactores UASB, un acidogénico operado en condiciones mesofílicas (35°C), seguido de un reactor metanogénico termofílico (56°C). Los resultados obtenidos muestran que en el reactor acidogénico tiene una eficiencia de solubilización de 30 a 40 %. y la composición del biogás fue de 70% CO<sub>2</sub> y 30 % CH<sub>4</sub>; sin embargo en este reactor no se determinó la cantidad de sólidos que sedimentaron.

### 1.3 JUSTIFICACION

En la actualidad, la mayor parte de los lodos residuales, ya sean industriales o municipales, están siendo dispuestos o acumulados sin un tratamiento previo de estabilización, esto porque eleva considerablemente los costos operacionales de la planta y con ello las tarifas del servicio. La solución en estos momentos es disponerlos en rellenos sanitarios, con lo que se aumenta el impacto que tienen en el ambiente, tales como la generación de lixiviados y producción de gases, sin contar además que, con los grandes volúmenes de lodos que se generan se está disminuyendo la vida útil de estos sistemas de disposición de residuos.

La acumulación de lodos no estabilizados principalmente por su difícil hidrólisis, puede generar problemas a la salud y al medio ambiente debido al alto contenido de microorganismos patógenos y a la generación de malos olores producidos por la putrefacción de la materia orgánica remanente. Es por esta razón que una adecuada disposición de lodos adquiere importancia, debido al crecimiento de los centros urbanos y a los crecientes volúmenes de lodos que se irán generando a medida que se incremente el número de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Dado que una etapa limitante en la digestión anaerobia de lodos es la hidrólisis de los biopolímeros, en este trabajo se utilizaron diferentes fuentes de inóculo para mejorar la eficiencia en esta etapa.

## 1.4 OBJETIVOS

### General

- Evaluar mediante cinéticas en lote a 35 °C Y PH =5 la solubilidad de una mezcla de lodo primario-secundario con diferentes fuentes de inóculo.

### Particulares

- Evaluar a 35 °C y PH =5 la etapa de hidrólisis y acidogénesis utilizando como fuente de inóculo:
  - Estiércol de vaca (EV)
  - Lodo acidogénico (LA)
  - Lodo metanogénico (LM)
  - Mezcla inóculos: (EV, LA, LM)
- Montaje y operación de un reactor UASB para la remoción de lodos residuales con el mejor inóculo probado en condiciones mesofílicas.

# CAPITULO

## 2

# MATERIALES Y METODOS

---

*"Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios"*

*J.B.J. José Miguel Guzmán Luis*

### 2.1 EVALUACIÓN DE PARAMETROS

En el desarrollo de las cinéticas los parámetros que se evaluaron fueron el PH, sólidos totales (ST), sólidos volátiles(SV), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), demanda química de oxígeno total y soluble (DQO<sub>T</sub> Y DQO<sub>S</sub>), ácidos grasos volátiles (AGV), biogás(CH<sub>4</sub> Y CO<sub>2</sub>); al inicio y al final de cada cinética, que duró 96 horas. Mientras que en los tiempos intermedios (cada 24 horas) solo se determinó el volumen de biogás desplazado y los AGV producidos.

En la operación del reactor UASB de igual manera se evaluaron los parámetros anteriormente mencionados, tanto a la entrada como a la salida del reactor. Las determinaciones se realizaron cada tercer día.

A continuación se describen los métodos de cada uno de los parámetros evaluados en las cinéticas y en el reactor acidogénico.

#### 2.1.2 Determinación de pH

El pH, se determinó mediante un potenciómetro (Figura 2.1) Corning pH/ ion Analyzer 455, con un electrodo Conductronic, a 25.5 °C. De acuerdo a los pasos siguientes:

- Colectar en un vaso de precipitado 20 mL de muestra.
- Verificar que el potenciómetro se encuentre calibrado.
- Agitar la muestra utilizando un agitador magnético hasta homogeneizar completamente.
- Verificar que la temperatura de la muestra sea aproximadamente de 25°C, ajustar en un baño de agua si es necesario.
- Sacar el electrodo de la disolución de reposo en que normalmente se encuentra, enjuagarlo con agua destilada, secarlo cuidadosamente solo para eliminar el exceso de la disolución de enjuague, cuidando de no friccionar el bulbo.
- Proceder a realizar la medición de pH de la muestra, la lectura aparecerá en pantalla. Al terminar la medición, el electrodo debe enjuagarse con agua destilada hasta eliminar cualquier posible residuo de la disolución de prueba, y almacenarlo en la disolución de reposo.

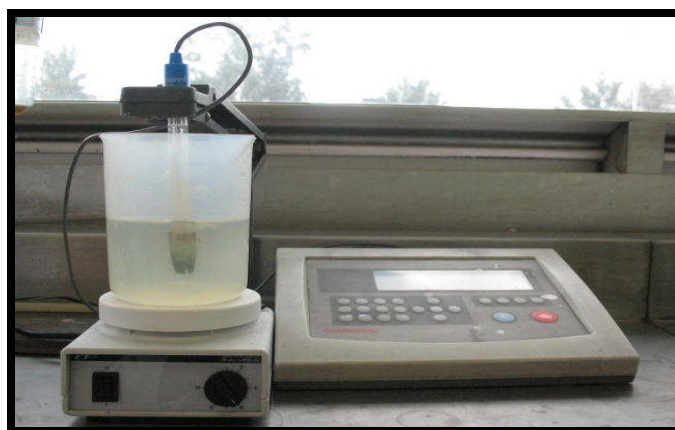


Figura 2.1 Determinación del pH.

### 2.1.3 Determinación de DQO total y soluble

La DQO es usada como una medida del contenido de oxígeno equivalente necesario para la oxidación de la materia orgánica de una muestra que es susceptible a ser oxidada por un oxidante químico fuerte.

La DQO total y soluble se determinaron por refluo cerrado de acuerdo con los Standard Methods, APHA, AWWA, WPFC (1995). Figura 2.2

Se utilizó el procedimiento descrito por Hach, utilizando 2 mL, de muestra con dilución 5/50 para la DQO total, y la DQO soluble sin dilución.

Para la realización de esta técnica primeramente se prepararon dos soluciones.

#### 1. Solución Digestora.

Se seca durante dos horas a 103 °C, 50 g de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) se enfrían posteriormente en un desecador y se pesan 42.25 g. Por otro lado se pesan 33.3 g de  $HgSO_4$ . En un matraz aforado, se disuelve el dicromato de potasio en 500 mL de agua destilada. Se añade el sulfato mercúrico. Adicionando en baño de hielo y muy lentamente 167 mL de  $H_2SO_4$  puro. Cuando la mezcla se enfría se disuelve lentamente y se afora a un litro.

#### 2. Solución de ácido sulfúrico puro con sulfato de plata.

Se pesa suficiente sulfato de plata para una proporción 5.5 g  $AgSO_4/Kg$  de  $H_2SO_4$ . Para calcular la cantidad exacta se considera el peso específico y la pureza del ácido sulfúrico. En un matraz aforado de 1 L, se agregan 300 mL del ácido y 26.03 g sulfato de plata. Se deja en reposo durante tres días para que se disuelva.



Figura 2.2 Determinación de DQO

#### Procedimiento

- Encender la parrilla para DQO y dejarla calentar por 30 minutos hasta alcanza una temperatura de 150 °C.
- Tomar una muestra de 5 mL y filtrarla al vacío, utilizando un disco de microfibras de vidrio de 55 mm de diámetro, y del filtrado se toma la muestra para la DQO soluble. La alícuota para DQO total se toma directamente de la muestra.
- En un tubo HACH con tapa de rosca se agregan 2.0 mL de la muestra a analizar, en otro tubo se agregan 2.0 mL de agua destilada (para el blanco).
- Añadir 1 mL de la solución digestora.
- Añadir lentamente 2 mL de la solución de ácido con plata.

- f) Tapar los tubos y homogenizar la muestra agitando suavemente.
- g) Colocar los tubos en la parrilla para digestión durante 2 horas a una temperatura de 150 °C.
- h) Una vez fríos se leen en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm, ajustando a cero con el blanco.

Para conocer las concentraciones reales de DQO total y soluble de la muestra se utiliza la curva estándar con glucosa que se describe mas adelante. Mientras que en el cálculo de la eficiencia de formación de DQOs se utilizaron las siguientes formulas:

$$[(DQOs \text{ salida} - DQOs \text{ entrada}) / DQOs \text{ salida}] * 100$$

$$[(DQOT \text{ entrada} - DQOs \text{ salida}) / DQOs \text{ entrada}] * 100$$

#### 2.1.4 Determinación de sólidos en todas sus formas

Los sólidos se determinaron por Standard Methods, APHA, AWWA, WPFC (1995).

Los métodos se basan en la evaporación y calcinación de la muestra, en donde los residuos de una y otra operación sirven de base para el contenido de sólido. El contenido de sólidos de una muestra se termina por el método gravimétrico. Figura 2.3.

Procedimiento para sólidos totales:

- a) Los crisoles deben estar limpios y secos, numerarlos y pesarlos.
- b) Colocarlos dentro de la estufa a una temperatura de 103-105°C y mantenerlos durante dos horas.
- c) Sacar y colocar los crisoles con unas pinzas en un desecador durante 15 minutos.
- d) Pesar y repetir el ciclo a partir del inciso b), hasta obtener peso constante (G1).
- e) Añadir un volumen de 10 mL (0.01 L) de muestra (bien mezclado) al crisol.
- f) Evaporar completamente el líquido de la muestra mediante calentamiento del crisol en una parrilla; exponer a temperatura baja (50°C) para evitar derramamientos o salpicaduras.
- g) Colocar el crisol en la estufa a una temperatura de 103-105 °C durante una hora.
- h) Transcurrido el tiempo, sacar y colocar el crisol en un desecador durante 15 minutos.
- i) Pesar el crisol (G2).
- j) El aumento en el peso del crisol representa los sólidos totales y se calculan mediante la siguiente formula:

$$ST= (G2 - G1) / Vm$$

Donde:

ST= Sólidos totales (g/L), G1= Peso del crisol a peso constante (g), G2= Peso del crisol + muestra seca (g), Vm= Volumen de muestra (L)





**Figura 2.3** Determinación sólidos

#### Procedimiento para sólidos volátiles

- Calcinar los residuos obtenidos del método anterior (ST) a 550 °C en una mufla durante 15 minutos.
- Poner en el desecador, dejar enfriar y posteriormente pesar (G3).
- Los sólidos volátiles se calculan mediante la siguiente formula:

$$SV = ST - [(G3 - G2) / Vm]$$

Donde:

SV= Sólidos volátiles (g/L), ST= Sólidos totales (g/L), G2= Peso del crisol + muestra seca (g),  
 G3= Peso del crisol + material calcinada (g)  
 Vm= Volumen de muestra (L), SF= (G3 - G2) / Vm.

Reescribiendo la formula anterior los sólidos volátiles se calculan de la siguiente manera:

$$SV = ST - SF$$

Los sólidos suspendidos totales se calculan de la misma manera que los sólidos totales y los sólidos suspendidos volátiles igualmente que los sólidos volátiles, pero en lugar de los crisoles se utilizan charolas de aluminio con un disco de fibra de vidrio en donde la muestra es filtrada.

Para determinar la eficiencia de destrucción de los sólidos en todas sus formas, se utilizó la siguiente formula:

$$[(\text{Sólidos entrada} - \text{Sólidos salida}) / \text{Sólidos entrada}] * 100$$

### 2.1.5 Determinación de AGV

Los AGV, se determinan en un cromatógrafo de gases HP con un detector de ionización de flama (FID), empleando un columna capilar superox FA de 10 metros (AT 1000), bajo las siguientes condiciones de operación: temperatura de columna: 120 °C, temperatura de inyección: 130° C, temperatura del detector: 150°C, N<sub>2</sub> como gas acarreador a 3 mL/min, un volumen de inyección, 0.2 µL, con un tiempo de inicio de 1 minuto y un tiempo final de 5 minutos a un rango de temperatura de 10<sup>0</sup> / min. Figura 2.4.

La determinación de AGV se realizó de la siguiente manera:

- Tomar un volumen de muestra de 5 mL, y filtrarla al vacío, utilizando un disco de microfibras de vidrio de 55 mm de diámetro.
- Del filtrado, se toma una alícuota de 950 µL que se coloca en viales y adicionar 50 µL de HCl al 50%.
- Inyectar 0.2 µL al cromatógrafo.

Para conocer las concentraciones de AGV se utiliza la curva de calibración que se describe mas adelante. La eficiencia de formación de AGV se calculó de la siguiente manera:

$$[(AGV \text{ salida} - AGV \text{ entrada}) / AGV \text{ salida}] * 100$$

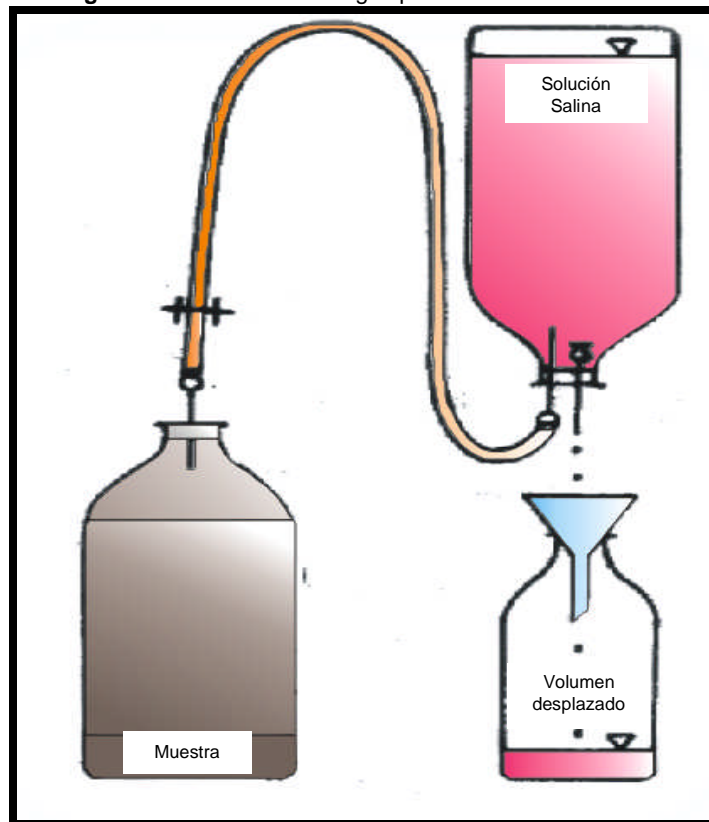
Figura 2.4 Determinación de AGV.



### 2.1.6 Determinación del biogás

El volumen de biogás producido se mide por desplazamiento de una solución de NaCl (250 g/L) a pH de 2, (Figura 2.5) la composición del biogás, se analiza por cromatografía de gases utilizando un cromatógrafo Gow-MAc serie 550 con detector de conductividad térmica (TCD) equipada con una columna de carosphere, bajo las siguientes condiciones de operación: temperatura de la columna: 140°C, temperatura del detector: 190°C, temperatura del inyector: 170°C, corriente de los filamentos 120 mA y helio como gas acarreador a 30 mL/min.

Figura 2.5 Medición del biogás producido en las cinéticas



## 2.2 ESTANDARIZACIÓN DE TÉCNICAS ANALÍTICAS

### 2.2.1 Curva estándar para la determinación de DQO<sub>T</sub> Y DQO<sub>S</sub>

Para llevar a cabo la determinación de la concentración de materia orgánica expresada en DQO<sub>T</sub> Y DQO<sub>S</sub> se realizó una curva estándar o patrón elaborada a partir de una solución madre con glucosa en una concentración de 1000 mg/L como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Preparación de las diferentes concentraciones de la curva patrón

Volumen total (mL)	Concentración (mg/L)	Volumen (mL) de solución patrón 1000 mg/l	Volumen de H <sub>2</sub> O (mL)
2	0	0	2
2	200	0.2	1.8
2	400	0.4	1.6
2	600	0.6	1.4
2	800	0.8	1.2
2	1000	1.0	1.0

Las muestras se prepararon por triplicado, Se midieron las absorbancias a 620nm.

Se graficó el promedio de cada una de las absorbancias contra su respectiva concentración (Figura 2.6) y se obtuvo la ecuación y el coeficiente R<sup>2</sup> de las rectas.

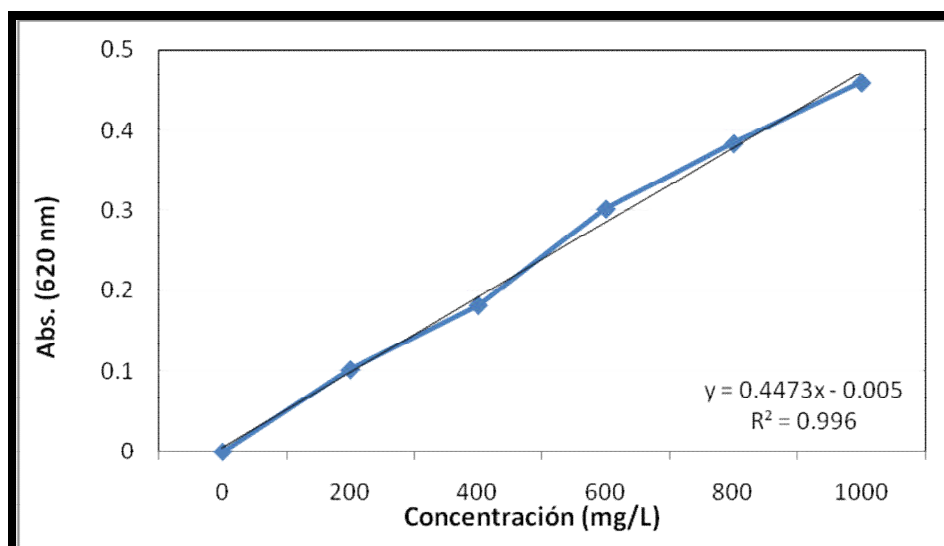


Figura 2.6 Curva estándar de DQO.

## 2.2.2 Curva estándar para la determinación de AGV.

Para determinar la concentración de ácido acético, propiónico, isobutírico y butírico producidos durante la hidrólisis y fermentación se realizó una curva de calibración que se elaboró a partir de una solución madre de estos compuestos. Se realizaron dos curvas patrón de AGV, una con concentración de 0 a 100 mg/L, y otra de 100 a 2000 mg/L

Se prepararon soluciones patrón de los compuestos de 100 y 2000 mg/L; agregando las cantidades que se muestran en la Tabla 2.2, en matraces aforados de 100 mL.

**Tabla 2.2** Composición de las soluciones patrón por concentración.

compuesto	100 mg/L	2000 mg/L
Acético (µL)	114.2	571.4
Propionico (µL)	14.93	747.5
Isobutírico (µL)	18.33	919.15
Butírico (µL)	18.54	919.12

A partir de las soluciones patrón se realizaron diluciones con agua destilada para tener intervalos de concentración de 10 a 100 mg/L y de 200 a 2000 mg/L, como se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Preparación de las diferentes concentraciones de las curvas patrón de AGV.

Volumen Total (µL)	Concentración (mg/L) 100 mg/L	Volumen solución patrón (µL) 100 mg/L	Volumen H <sub>2</sub> O (µL)	Volumen HCl (µL)	Volumen H <sub>2</sub> O (µL)	Volumen solución patrón (µL) 2000 mg/L	Concentración (mg/L) 2000 mg/L
1000	100	950	0	50	0	950	2000
1000	90	850	50	50	50	850	1800
1000	80	750	150	50	150	750	1600
1000	70	650	250	50	250	650	1400
1000	60	550	350	50	350	550	1200
1000	50	450	450	50	450	450	1000
1000	40	350	550	50	550	350	800
1000	30	250	650	50	650	250	600
1000	20	150	750	50	750	150	400
1000	10	50	850	50	850	50	200
1000	0	0	950	50	950	0	0

Las muestras se prepararon por triplicado, adicionando 50 µL de HCl para acidificar.

A partir de los tiempos de retención durante la corrida se identificaron los compuestos en su orden de elusión. Los tiempos de retención de cada compuesto: Acético 1.7 min, Propiónico 2.54 min, Isobutírico 2.80 min, Butírico 3.57 min.

Por cada muestra se obtuvo el área de cada pico del cromatograma, La variación de las áreas obtenidas, en la curva patrón o estándar de 100 mg/L fue menor al 10% entre los triplicados.

Se graficó el promedio de cada una de las áreas contra su respectiva concentración (Figura 2.7) y se obtuvo la ecuación y el coeficiente  $R^2$  de las rectas. Estas ecuaciones (Tabla 2.4) se utilizaron durante todo este trabajo experimental para calcular las concentraciones de cada AGV.

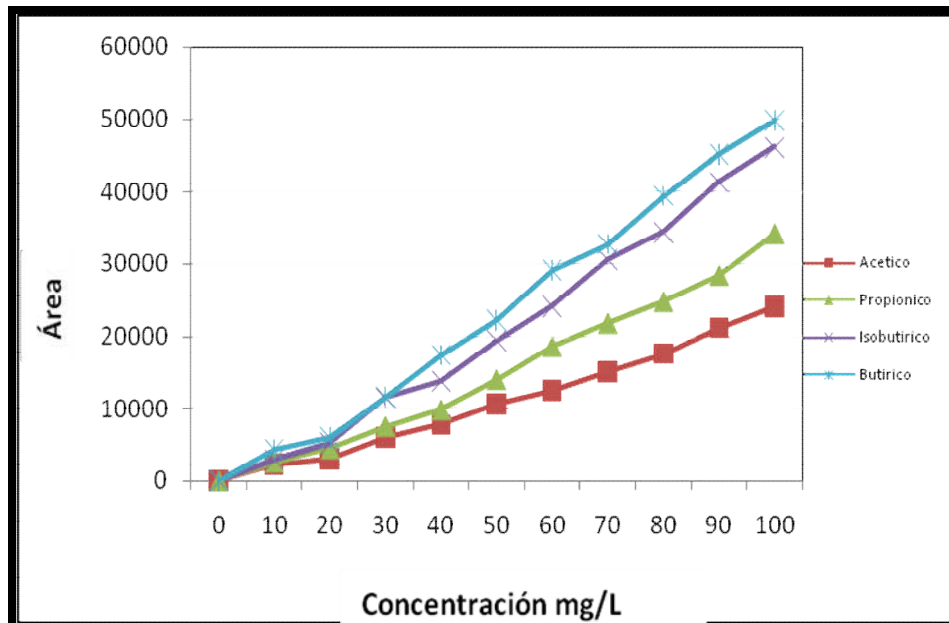


Figura 2.7 Curvas estándar de AGV (0 - 100 mg/L).

Tabla 2.4 Ecuaciones y coeficientes  $R^2$  para cada recta en la curva estándar (0 - 100 mg/L).

Compuesto	Ecuación	$R^2$
Acético	$Y=5294.6 X - 3366.4$	0.9951
Propiónico	$Y=4917.4 X - 4106.7$	0.9927
Isobutírico	$Y=3492.9 X - 2635.5$	0.9801
Butírico	$Y=2387.5 X - 3404.3$	0.9704

Para la curva estándar de 2000 mg/L, se obtuvo el área de cada pico del cromatograma, la variación de las áreas obtenidas, en la curva patrón o estándar de 2000 mg/L fue menor al 10% entre los triplicados, por lo tanto se obtuvieron promedios.

Se graficó el promedio de cada una de las áreas contra su respectiva concentración (Figura 2.8) y se obtuvo la ecuación y el coeficiente  $R^2$  de las rectas (Tabla 2.5).

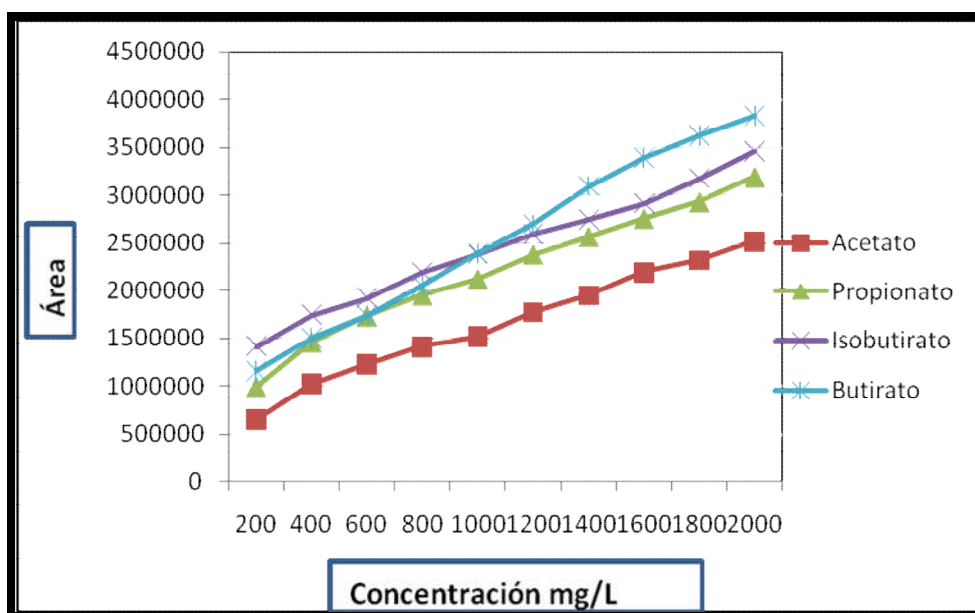


Figura 2.8 Curvas estándar de AGV (0 - 2000 mg/L).

Tabla 2.5 Ecuaciones y coeficientes  $R^2$  para cada recta en la curva estándar (0 - 2000 mg/L).

Compuesto	Ecuación	$R^2$
Acético	$Y=41489 X - 27183$	0.989
Propiónico	$Y=50830 X - 19607$	0.974
Isobutírico	$Y=3E+06 X - 89151$	0.960
Butírico	$Y=62368 X - 35304$	0.974



### 2.3 Muestreo del lodo residual

El lodo primario, se colectó de los vasos de purga del tanque de sedimentación primaria y el lodo secundario, del tanque de aireación, de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas “Cerro de la Estrella” ubicado en Iztapalapa, México. (Figura 2.9) Luego, se procedió a su tamizado utilizando una malla de 0.225 mm, a fin de retirar todos aquellos sólidos gruesos que pudieran interferir en la operación del sistema.



Figura 2.9 Planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la estrella”.

### 2.4 Muestreo de inóculos.

Por su parte el estiércol de vaca utilizado fue muestreado del establo “El caballito” ubicado en Iztapalapa, México; los lodos acidogénico y metanogénico, de reactores del laboratorio de microbiología ambiental y tratamiento de aguas residuales. Figura 2.10.



Figura 2.10 Reactores donde se muestrearon los lodos: acidogenico y metanogenico



## 2.5 Caracterización de lodos residuales

La Caracterización de lodos residuales primarios y secundarios (LP Y LS) utilizados en las diferentes cinéticas y en el reactor se realizó con el propósito principal de saber la concentración de ST con que los lodos provenientes de la planta de tratamiento (tabla 2.6), ya que esta concentración se ajustó tanto en el caso de las cinéticas como en la operación del reactor a  $8.0 \pm 0.5$  g/L.

**Tabla 2.6** Concentración de sólidos y DQO de lodos residuales

Parámetro	Lodo Primario	Lodo secundario
PH	$6 \pm 0.5$	$7 \pm 0.5$
Sólidos Totales "ST" (g/L)	<b><math>22.47 \pm 10</math></b>	<b><math>7.6 \pm 3.3</math></b>
Sólidos Volátiles "SV" (g/L)	$12.05 \pm 4.2$	$7.11 \pm 3.2$
Sólidos suspendidos Totales "SST" (g/L)	$17.10 \pm 9.2$	$6.7 \pm 4.4$
Sólidos suspendidos Volátiles "SSV" (g/L)	$11.50 \pm 5.40$	$6.60 \pm 4.2$
DQO total "DQOT" (g/L)	$17 \pm 8.5$	$8.39 \pm 5$
DQO "DQOS" (g/L)	$1.17 \pm 0.43$	$0.33 \pm 0.16$

El ajuste de la concentración de sólidos totales se efectuó mediante la fórmula que se muestra a continuación; en el caso del lodo primario se diluyó y en el caso del lodo secundario se concentró para llegar a la concentración de  $8.0 \pm 0.5$  g/l.

$$V1 \cdot C1 = C2 \cdot V2$$

Despeje

$$V1 = (C2 \cdot V2) / C1$$

Donde

V1=Volumen de lodo a diluir o a espesar según sea el caso, C2= Concentración a la cual provienen los lodos de la planta de tratamiento, V2=Volumen total de lodo C1=concentración de ST a  $8.0 \pm 1.0$  g/L.

Ya realizado el ajuste de la concentración de sólidos totales y del pH a 5, se realizó de nuevo la caracterización de las proporciones a trabajar. Estos resultados provienen de 10 lotes muestreados. Tabla 2.7.

**Tabla 2.7** Caracterización de lodo residual diluido y espesado a  $8.0 \pm 1.0$  g/L de ST y a pH de 5.

Parámetro	Lodo Primario (LP)	Lodo secundario (LS)	LP/LS 70/30	LP/LS 50/50	LP/LS 30/70
PH	$5 \pm 0.02$	$5 \pm 0.02$	$5 \pm 0.02$	$5 \pm 0.02$	$5 \pm 0.02$
Sólidos Totales "ST" (g/L)	<b><math>8.11 \pm 3</math></b>	<b><math>7.9 \pm 1.6</math></b>	<b><math>8.21 \pm 1.1</math></b>	<b><math>8.04 \pm 2.3</math></b>	<b><math>8.19 \pm 2.1</math></b>
Sólidos Volátiles "SV" (g/L)	$5.16 \pm 1.5$	$5.84 \pm 1.1$	$5.03 \pm 1.1$	$5.35 \pm 3.4$	$5.26 \pm 2.8$
Sólidos suspendidos Totales "SST" (g/L)		$6.3 \pm 1.5$	$6.14 \pm 0.9$	$6.11 \pm 1.3$	$6.26 \pm 1$
Sólidos suspendidos Volátiles "SSV" (g/L)	$3.62 \pm 1.78$	$3.28 \pm 2.2$	$3.44 \pm 0.9$	$3.73 \pm 2.0$	$3.88 \pm 1.6$
DQO total "DQOT" (g/L)	$10 \pm 1.5$	$5.51 \pm 1.9$	$9 \pm 1.7$	$8.39 \pm 5$	$6.16 \pm 0.8$
DQO "DQOS" (g/L)	$2.12 \pm 0.21$	$1.1 \pm 0.17$	$3.42 \pm 0.5$	$3.01 \pm 0.3$	$2.15 \pm 0.6$
AGV (mg/L)	$455 \pm 25$	$314 \pm 36$	$509 \pm 32$	$400 \pm 51$	$374 \pm 51$

## 2.6 Caracterización de los inóculos

Se realizó la caracterización de los inóculos utilizados en las diferentes cinéticas, con el propósito de saber la cantidad de materia orgánica que contenían éstos. Tabla 2.8.

**Tabla 2.8** Caracterización de inóculos

PARÁMETRO	Estiércol de vaca	Lodo acidogénico	Lodo Metanogénico
pH	$8.5 \pm 0.3$	$5.04 \pm 0.5$	$7.35 \pm 0.7$
Sólidos Totales "ST" (g/L)	<b><math>86.3 \pm 3.5</math></b>	<b><math>47.01 \pm 5.1</math></b>	<b><math>39.06 \pm 8</math></b>
Sólidos Volátiles "SV" (g/L)	$73.6 \pm 5$	$39.94 \pm 4.6$	$32.54 \pm 6.2$
Sólidos suspendidos Totales "SST" (g/L)	$64.6 \pm 4$	$40.06 \pm 2.4$	$37.41 \pm 1.5$
Sólidos suspendidos Volátiles "SSV" (g/L)	$55.1 \pm 4.5$	$24.35 \pm 3.4$	$25.15 \pm 7.1$
DQO total "DQOT" (g/L)	$20.34 \pm 5.5$	$14.37 \pm 2.5$	$8.646 \pm 4.3$
DQO volátiles "DQOS" (g/L)	$9.56 \pm 1.5$	$11.41 \pm 2.2$	$5.264 \pm 3.8$

## 2.7 Diseño experimental de las cinéticas en lote

Se hicieron diferentes proporciones de lodo, como se observa en la tabla 2.9 Con una concentración de ST de  $8.0 \pm 0.5 \text{ g/L}$ . Se realizaron dos diferentes diseños experimentales, uno para la cinéticas con estiércol de vaca, lodo acidogénico y lodo metanogénico por separado y otro para la cinéticas de mezclas de inóculos en donde se trabajaron solo las proporciones de LP/LS de 70/30 y 50/50 a la misma concentración de ST (Tabla 2.10).

**Tabla 2.9** Proporciones de lodos trabajadas durante las cinéticas con lodo acidogénico y lodo metanogénico.

PROPORCIONES DE LODO RESIDUAL A $8.0 \pm 0.5 \text{ g/L}$				
Control Lodo primario (CLP)	Control Lodo secundario (CLS)	Control Lodo P/S =70/30 (CL70/30)	Control Lodo P/S =50/50 (CL50/50)	Control Lodo P/S =30/70 (CL30/70)
Lodo primario con inóculo (LPI)	Lodo secundario con inóculo (LSI)	Lodo 70/30 con inóculo (L70/30 I)	Lodo 50/50 con inóculo (L50/50I)	Lodo 30/70 con inóculo (L30/70I)

**Tabla 2.10** Proporciones de lodos trabajadas durante la cinética de mezclas de inóculos.

PROPORCIONES DE LODO RESIDUAL A $8.0 \pm 0.5 \text{ g/L}$				
RELACIÓN P/S = 70/30	EV + LA	EV + LM	LA + LM	EV + LA + LM
RELACIÓN P/S = 50/50	EV + LA	EV + LM	LA + LM	EV + LA + LM

## 2.8 Montaje de las cinéticas en lote con estiércol de vaca, lodo acidogénico y lodo metanogénico

Una vez caracterizadas las proporciones correspondientes de lodo y de inóculos, se procedió a montar la cinética, en botellas serológicas de 120 mL, con un volumen de operación de 80 mL. El control sin inóculo en las diferentes proporciones de lodo utilizadas, se trabajó con 80 mL y las botellas con lodo e inóculo se trabajaron 64 y 16 mL respectivamente. Figura 2.11.

Las cinéticas se incubaron a  $35^\circ\text{C}$  con agitación a 150 RPM. Figura 2.12.

Los parámetros que se evaluaron fueron el PH, ST, SV, SST, SSV,  $\text{DQO}_T$  y  $\text{DQO}_S$ , AGV, biogás ( $\text{CH}_4$  Y  $\text{CO}_2$ ); al inicio y al final de cada cinética, que duró 96 horas. Mientras que en los tiempos intermedios (cada 24 horas) solo se determinó el volumen de biogás desplazado y los AGV producidos.

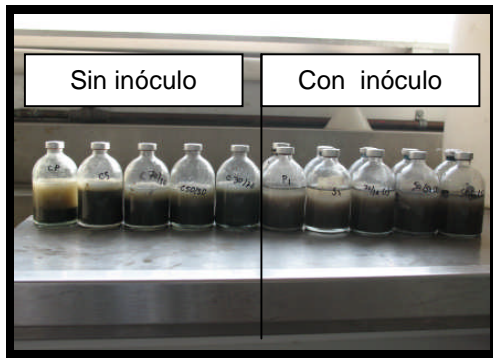


Figura 2.11 Muestras sin y con inóculo.



Figura 2.12 Incubación de las muestras a 35 °C

## 2.9 Cinéticas en lote con una mezcla de inóculos

Para estas cinéticas se trabajó con las proporciones LP/LS de 70/30 y 50/50, que fueron las proporciones que mejores resultados presentaron en las cinéticas anteriores, con una mezcla de los inóculos.

Las cinéticas, se trabajaron en botellas serológicas de 120 mL, con 80 mL de volumen de operación, en donde se agregaron 64 ml de lodo y 16 con ml de inóculo repartido proporcionalmente, es decir cuando se mezclaron dos inóculos se agregaron 8 mL de c/u, en el caso de la mezcla de tres inóculos se agregó 5.33 mL de cada uno.

Posteriormente las botellas se incubaron a 35°C con agitación a 150 RPM (Figura 2.12). Se evaluaron los mismos parámetros que en las cinéticas anteriores y en los mismos intervalos de tiempo.

## 2.10 Montaje y monitoreo del reactor UASB

Se montó un reactor UASB de 1.21 L, con un volumen útil de 1.08 L, para operarlo en condiciones acidogénicas. El inóculo provino de un reactor acidogénico con un tiempo de operación de año y medio.

El reactor se operó con dos propósitos, el primero fue para obtener el lodo acidogénico utilizado en las cinéticas y el segundo para evaluar la hidrólisis de lodos con la mejor proporción de LP/LS encontrada en las cinéticas a diferentes tiempos de retención hidráulica. El diseño del reactor se muestra en la Figura 2.13.

Los parámetros que se evaluaron fueron el pH, ST, SV, SST, SSV, DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>S</sub>, AGV, biogás (CH<sub>4</sub> Y CO<sub>2</sub>) cada tercer día. Por los métodos anteriormente descritos en la secciones 2.1 a la 2.6.

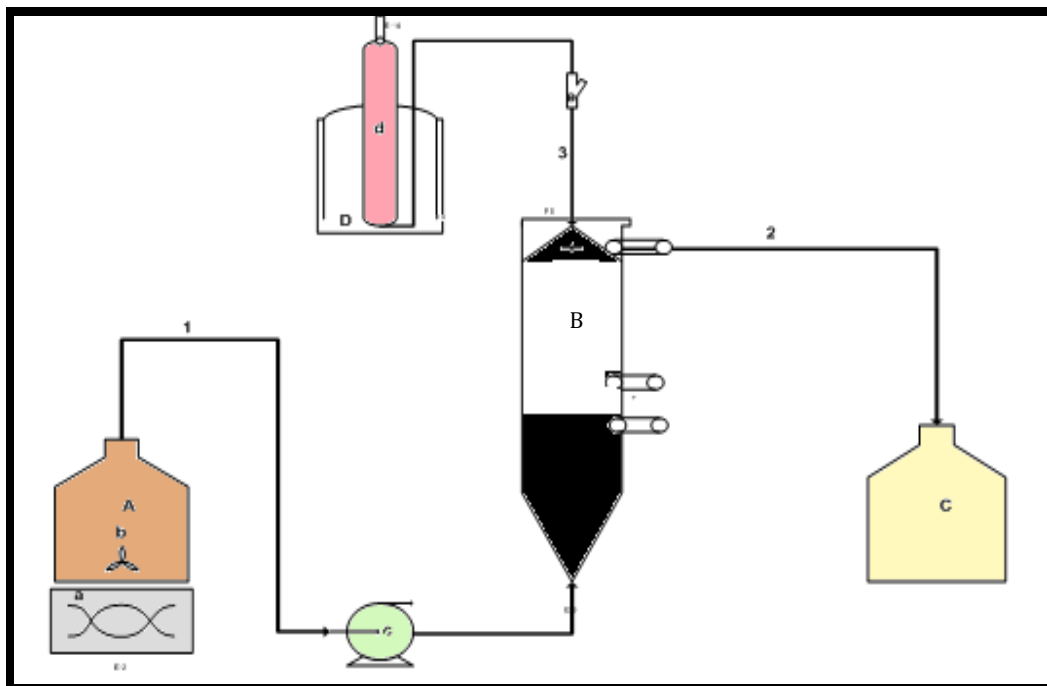


Figura 2.13 Esquema del reactor UASB.

Tabla 2.11 Simbología del esquema del diseño de operación del reactor UASB

1. Alimentación de lodo	A. Recipiente de alimentación	a. Parrilla de agitación
2. Lodo hidrolizado	B. Reactor UASB acidogénico	b. Agitador magnético
3. Línea de desfogue de biogás	C. Receptor de lodo hidrolizado	c. Bomba peristáltica
	D. Recipiente de solución salina	d. Columna de desplazamiento de biogás
		e. Toma de muestra de biogás

## 2.11 Funcionamiento del reactor.

El lodo residual se alimentó al reactor por medio de una bomba peristáltica (c), Cole–Palmer de 1-100 rpm con controlador MasterFlex, el lodo hidrolizado se recolectó en un recipiente (C).

En la parte superior del reactor acidogénico, se colocó una columna con solución salina a 250 g/L de NaCl con una línea de desfogue de biogás en la que se muestreó para determinar su composición.

El reactor se operó bajo las condiciones mostradas en la tabla 2.12.

Tabla 2.12 Condiciones iniciales de operación del reactor UASB

Condiciones de operación	Alimentación
Proporción lodo primario/secundario	50/50
Concentración de ST ( g/L)	8
pH	5
Temperatura(°C)	35

## 2.12 Purga de lodos

Debido a que el reactor UASB trabajó sin agitación hubo una acumulación de lodo, por tal motivo se realizaron cuatro purgas, las cuales afectan directamente al tiempo de retención de sólidos (TRS), el cual se muestra en el capítulo 3, al igual que el volumen de lodo purgado.

El tiempo de retención de sólidos fue determinado por la fórmula que a continuación se muestra:

$$TRS = (SSVr * Vr) / Fe * [ (SSVe - SSVs) - Fp*(SSVs - SSVr) ]$$

Donde:

TRS=Tiempo de retención de sólidos

TRH= $V_R / F$

$F=1 / TRH$ ,  $F=V_R / TRH$

SSVr= Sólidos suspendidos volátiles en el reactor, Vr = Volumen del reactor, Fe= Flujo de entrada de reactor, SSV<sub>E</sub>= Sólidos suspendidos volátiles de entrada, SSV<sub>S</sub>= Sólidos suspendidos volátiles de salida, Fp= Flujo purga del reactor TRH= Tiempo de retención de sólidos.

## 2.13 Velocidad y eficiencia de hidrólisis

Para observar el grado de hidrólisis que se presentó en el reactor es necesario calcular la velocidad de hidrólisis y la eficiencia de hidrólisis a los diferentes TRH a los cuales se trabajó durante el experimento.

La velocidad de hidrólisis se calculó de la siguiente manera:

$$Vh=H / TRS$$

Donde:

Vh= Velocidad de hidrólisis

H=SSVe - SSVs

SSVs= SSVp + SSVe

SSVe=sólidos suspendidos volátiles de entrada, SSVp= sólidos suspendidos volátiles de la purga, SSVs= sólidos suspendidos volátiles de salida., TRS=Tiempo de retención de sólidos

La eficiencia de hidrólisis se determinó por la fórmula que a continuación se muestra:

$$\text{Ef h} = [ (SSV \text{ entrada} - SSV \text{ salida}) / SSV \text{ entrada} ] * 100$$

# CAPITULO

## 3

# RESULTADOS

## Y

# DISCUSIONES

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 3.1 CINÉTICAS EN LOTE

Como se mencionó anteriormente con el propósito de mejorar la eficiencia de la digestión anaerobia de lodos residuales en la etapa hidrolítica y acidogénica, en este trabajo se probaron estiércol de vaca (EV), lodo acidogénico (LA), lodo metogénico (LM) y una mezcla de estos inóculos, por medio de cinéticas en lote.

Los resultados que se muestran a continuación se dividieron de la siguiente manera; primero los resultados de las muestras sin y con inóculo de las cinéticas con EV, LA, LM, posteriormente los resultados de la cinéticas con mezclas de inóculos.

### 3.2 Cinéticas con EV, LA, LM

A continuación se muestran los resultados de las eficiencias de remoción y formación de cada uno de los parámetros en las muestras con inóculo en cada una de las tres cinéticas; estiércol de vaca (EV), lodo acidogénico (LA), lodo metanogénico (LM).

#### 3.2.1 pH

La Tabla 3.1 presenta el pH final de la diferentes cinéticas donde se observa que tanto en las muestras control como en las cinéticas con EV y LA se mantuvo en condiciones acidogénicas, lo cual favoreció la hidrólisis de los lodos; mientras que en las cinéticas con LM se elevó a 7.2, indicativo de que se favoreció la etapa metanogénica, por lo que se obtiene una mayor producción de CH<sub>4</sub> en el biogás, esto coincide con lo reportado por Montalvo (2003).

Tabla 3.1 pH en las cinéticas en lote.

CINÉTICA	pH				
	LP	LS	L70/30	L50/50	L30/70
Sin inóculo	5.29	5.83	5.25	5.40	5.39
Estiércol de vaca	5.94	6.01	5.81	5.70	6.05
Lodo acidogénico	5.2	5.29	<b>5.21</b>	5.25	5.27
Lodo metanogénico	7.12	7.15	7.2	7.17	7.22

LP=Lodo primario.

LS= lodo secundario.

#### 3.2.2 Sólidos suspendidos Volátiles (SSV)

En la tabla 3.2 se observa que las muestras con inóculo incrementaron su eficiencia de remoción de SSV en todas las proporciones trabajadas, obteniendo la mejor en la relación LP/LS de 70/30 y LP debido a que este tipo de lodo cuenta con una cantidad mayor de materia orgánica biodisponible, esto predominó en las muestras con y sin inóculo de las tres cinéticas.



En lo que se refiere al EV, los resultados indican que este ayuda a una mejor hidrólisis de los lodos residuales, como reporta Sabando (2006) que utilizó lodos de piscicultura con estiércol de vaca a 35°C, obteniendo un 73% de remoción de SSV con 60 días de experimento, resultado mayor a lo obtenido en este estudio.

La máxima remoción de SSV se da cuando se agrega LA con un 19.73%, resultado que es mayor a lo reportado por Shana y Assadi (2002) que reportan un 14.7 % con un lodo residual en un reactor acidogénico mesofílico, pero menor a lo reportado por Viguera (2002) en la digestión anaerobia con un pre tratamiento químico con un 27 % y al obtenido por Terreros (2007) en la digestión anaerobia en dos etapas que va del 30- 40% en la etapa acidogénica con TRH de 3 días.

En la cinética con LM, la máxima remoción de SSV fue del 18.63%, en la misma relación LP/LS de 70/30, solo que la materia orgánica fue transformada a CH<sub>4</sub> debido a las características del inóculo. Estos resultados son inferiores a los reportados por Terreros (2007) en su etapa metanogénica de 54.81 % con un TRH de 4 días.

**Tabla 3.2** Sólidos suspendidos volátiles en las cinéticas en lote

EFICIENCIA DE REMOCIÓN SSV (%)					
CINÉTICA	LP	LS	L70/30	L50/50	L30/70
Sin inóculo	7.40	4.56	8.34	5.84	5.38
Estiércol de vaca	9.08	6.89	9.58	6.68	6.15
Lodo acidogénico	18.13	11.66	19.73	15.20	13.14
Lodo metanogénico	16.11	13.38	18.63	15.25	14.53

### 3.2.3 Demanda química de Oxígeno total y soluble (DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>S</sub>)

En las tablas 3.3 y 3.4 se observa que las mejores eficiencias de remoción y formación de DQO se presentaron en las cinéticas con LA con 19.63 y 17.14 % respectivamente, con una relación de LP/LS de 70/30, indicativo que se presentó un buen grado de hidrólisis de la materia orgánica, estos resultados son inferiores a lo obtenido por Tsakou y col (2000) en un sistema acidogénico termofílico a 56 °C con un 27 % de formación de DQO soluble.

**Tabla 3.3** DQO total en las cinéticas en lote

EFICIENCIA DE REMOCIÓN DQO <sub>T</sub> (%)					
CINÉTICA	LP	LSI	L70/30	L50/50	L30/70
Sin inóculo	10.49	6.60	11.00	9.94	8.00
Estiércol de vaca	12.63	7.85	11.40	10.01	9.79
Lodo acidogénico	18.23	12.34	19.31	17.54	12.45
Lodo metanogénico	10.11	6.54	11.21	9.53	7.56

**Tabla 3.4** DQO soluble en las cinéticas en lote.

EFICIENCIA DE FORMACIÓN DQO <sub>T</sub> (%)					
CINÉTICA	LP	LS	L70/30	L50/50	L30/70
Sin inóculo	10.42	6.24	10.96	8.22	9.78
Estiércol de vaca	11.63	8.42	11.92	9.67	10.79
Lodo acidogénico	16.69	11.09	17.14	15.96	12.45
Lodo metanogénico	9.56	5.87	7.03	8.12	8.62

### 3.2.4 Ácidos grasos volátiles (AGV)

En lo que se refiere a la eficiencia de formación de AGV (Tabla 3.5), la máxima eficiencia de formación se observa en la cinética con LA con un 88.32 %, estos resultados son mayores a los obtenidos por Tsakou y col (2000) en un sistema acidogénico-termofílico semicontinuo con un 55.3% en la formación de AGV y por Shana y Assadi (2002) con una formación del 73%. La producción total de AGV en las tres cinéticas se observa en las Figuras 3.1, 3.2. y 3.3

Tabla 3.5 Ácidos grasos volátiles en las cinéticas en lote.

EFICIENCIA DE FORMACIÓN AGV (%) (ACETATO,PROPIONATO, ISOBUTIRATO, BUTIRATO)					
CINÉTICA	LP	LS	L70/30	L50/50	L30/70
Sin inóculo	56.31	43.31	58.37	55.76	52.05
Estiércol de vaca	60.37	47.65	61.30	56.96	53.77
Lodo acidogénico	85.71	71.11	88.32	73.47	60.53
Lodo metanogénico	0	0	0	0	0

Esta producción de AGV se puede deber al ajuste del pH a 5 que se realizó al principio de cada cinética, para inducir y favorecer la hidrólisis y acidogénesis y a la concentración de ST a la cual se trabajaron las muestras que fue de 8 g/L, ya que a una mayor concentración del lodo, la producción neta de AGV disminuye, debido a que para convertir estos sólidos en AGV, es necesario que el sustrato sea transformado en sustancias más simples y solubles mediante la hidrólisis, para que después las bacterias acidogénicas puedan transformar esta materia orgánica en AGV (Skalsky y Daigger 1995).

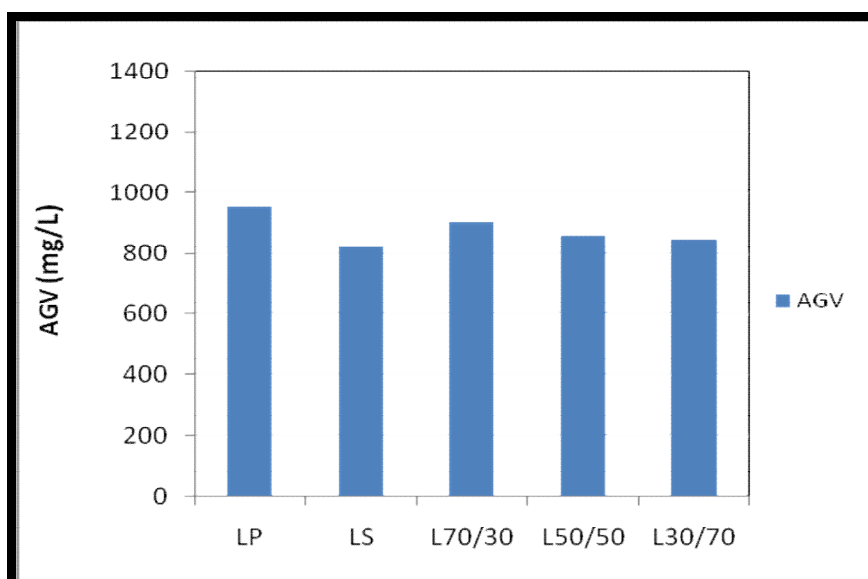


Figura 3.1 Producción de AGV en las cinéticas con estiércol de vaca

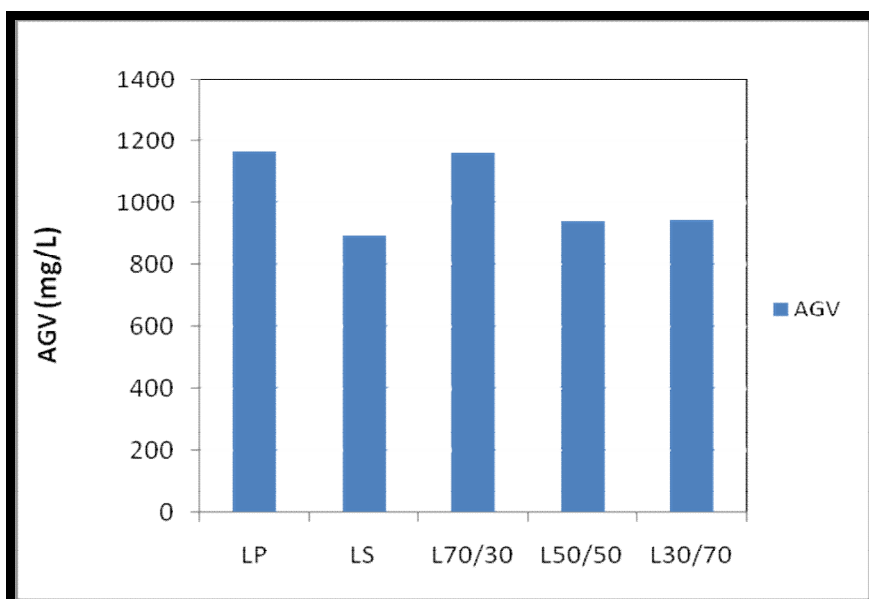


Figura 3.2 Producción de AGV en las cinéticas con lodo acidogénico

En las cinéticas con lodo metanogénico se observa que hubo una desaparición de AGV en las muestras con inóculo, con respecto al tiempo transcurrido, lo que corrobora lo dicho anteriormente que las condiciones del inóculo terminó dominando en la cinética favoreciendo la metanogénesis. Es decir la producción de AGV fue mayor, pero rápidamente transformada a  $\text{CH}_4$ . (Figura 3.3)

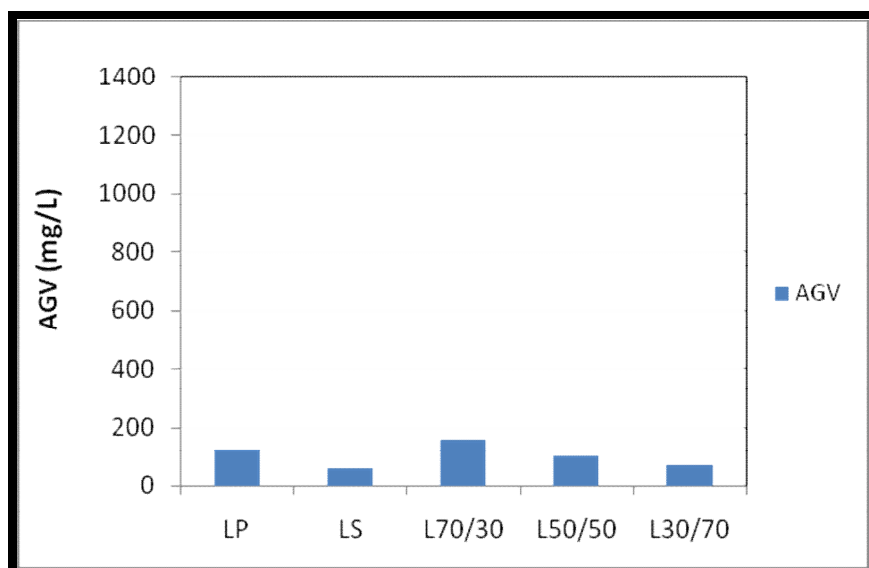


Figura 3.3 Producción de AGV en las cinéticas con lodo metanogénico.

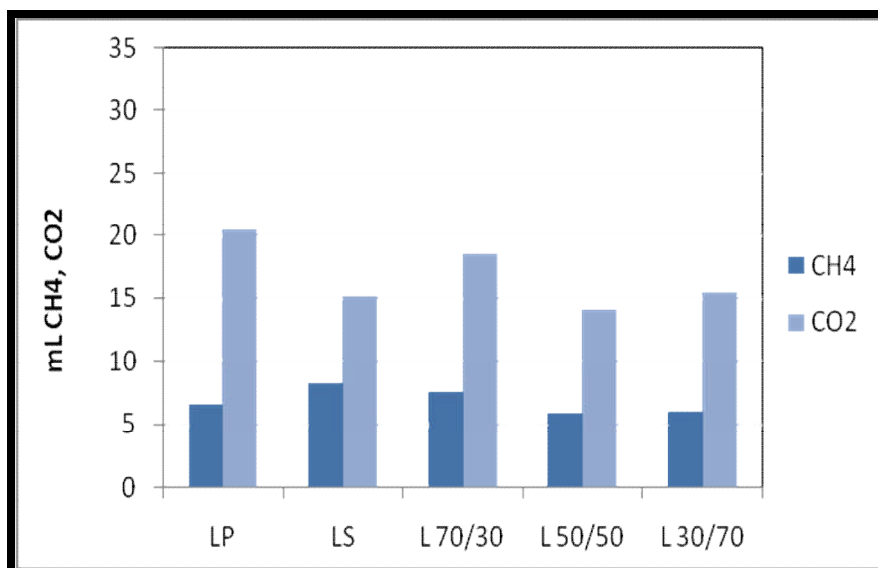
### 3.2.5 Biogás (CH<sub>4</sub> Y CO<sub>2</sub>)

La tabla 3.6 presenta la composición del biogás de cada una de las cinéticas, donde se observa que la concentración de CO<sub>2</sub> en el biogás producido, es mayor a la de CH<sub>4</sub> en la muestras sin inóculo (65-35 %) y en las cinéticas con LA y EV (Tabla 3.6) favoreciendo la etapa acidogénica, resultados similares a los encontrados por Terreros (2007) que estudia la digestión anaerobia en dos etapas de lodos primarios y secundarios. Pero diferente a lo mencionado por Montalvo (2003) que el EV favorece la producción de CH<sub>4</sub> debido a las bacterias metanógenas presentes, esta diferencia se puede deber al ajuste del pH al inicio de la cinética.

**Tabla 3.6** Biogás en las cinéticas en lote

Composición del biogás CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> (%)					
CINÉTICA	LP	LS	L70/30	L50/50	L30/70
Sin inóculo	35-65	38-62	35-65	37-63	31-69
Estiércol de vaca	24-76	35-65	29-71	30-70	27-73
Lodo acidogénico	26-74	28-72	26-74	27-73	22-78
Lodo metanogénico	<b>63-37</b>	<b>64-36</b>	<b>67-33</b>	<b>68-32</b>	<b>67-33</b>

En lo que se refiere a la producción de biogás es mayor en las cinéticas con LA en comparación con la de EV como se puede observar al comparar las figuras 3.4 y 3.5 esto coincide con lo que señaló Ağdağ & Sponza (2005) en su estudio de co-digestión de lodo industrial con la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, que dentro de los beneficios de la co-digestión anaeróbica aumenta la carga de materia orgánica biodegradable, mejora la producción de biogás y aumenta la velocidad de digestión.



**Figura 3.4** Producción de biogás en las cinéticas con estiércol de vaca

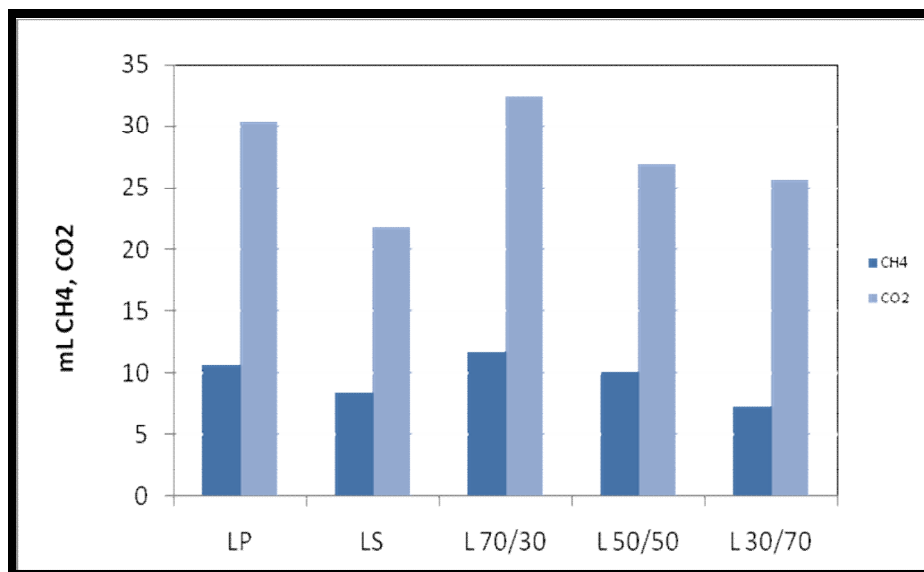


Figura 3.5 Producción de biogás en las cinéticas con lodo acidogénico

También se observa en la tabla 3.6 que en las cinéticas con LM la concentración de CH<sub>4</sub> en el biogás producido en la cinética es mayor a la concentración de CO<sub>2</sub>. En un rango de 65% de CH<sub>4</sub> y 35% de CO<sub>2</sub>, favoreciendo la etapa metanogénica como se menciona anteriormente. Estos resultados son cercanos a lo obtenidos por Terreros (2007) que son de un 70% de CH<sub>4</sub> y un 30% de CO<sub>2</sub> en un reactor metanogénico con un TRH de 3 días. Lo anterior se comprueba en la figura 3.6, donde se observa que la producción de CH<sub>4</sub> es mayor a la CO<sub>2</sub>.

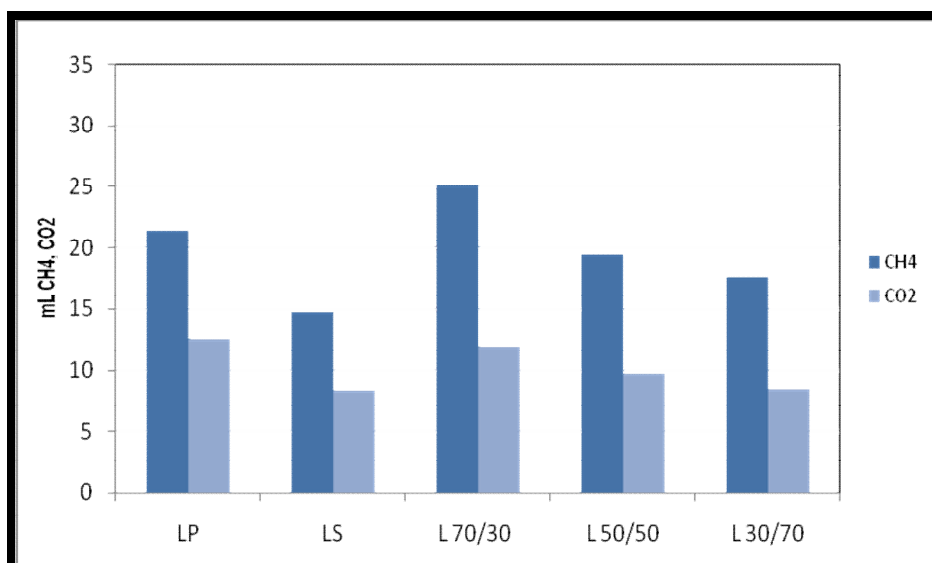


Figura 3.6 Producción de biogás en las cinéticas con lodo metanogénico

### 3.3 CINÉTICAS UTILIZANDO MEZCLA INÓCULOS.

Después de llevar a cabo las cinéticas individuales, se procedió a realizar otra con una mezcla de estos inóculos, con el fin de observar la sinergia y los efectos de éstos en lodos primarios y secundarios, esta cinética se realizó únicamente con la relación LP/LS de 70/30, que fue la mejor en las cinéticas anteriores y la relación 50/50 que es la proporción que mas se acerca a la que se producen los lodos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

#### 3.3.1. pH, SSV, DQO

En la tabla 3.7 se puede observar que el pH se mantuvo ácido con un valor alrededor de 5.27- 5.30, indicativo de que se favoreció la etapa acidogénica, lo que garantiza la producción de CO<sub>2</sub> y AGV.

De igual manera se puede observar que la máxima remoción de SSV se da en lodos con la mezcla EV+LA como inóculo, esto se presenta en ambas proporciones trabajadas con 26.03 y 24.03 % respectivamente. Este resultado es mayor a lo obtenido en las cinéticas anteriores con estiércol de vaca y lodo acidogénico, también se observa una mayor formación de DQO soluble, lo que indica una mayor degradación de la materia orgánica cuando se mezclan el lodo acidogénico con el estiércol de vaca.

Las muestras que contenían EV + LA incrementaron su eficiencia de remoción y formación de los parámetros analizados en las dos proporciones trabajadas, lo que indica que el lodo acidogénico ayuda a una mejor hidrólisis de los lodos residuales. Esto concuerda con lo encontrado por Campos (2001) que señala que la principal ventaja de la co-digestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas, y compensar carencias de cada uno de los inóculos por separado.

**Tabla 3.7** Eficiencia de consumo y formación de los parámetros evaluados en la cinética de mezclas de inóculos

RELACIÓN LP/LS	70/30				50/50			
PARAMETRO	EV+LA	EV+LM	LA+LM	EV+LA+LM	EV+LA	EV+LM	LA+LM	EV+LA+LM
PH	5.27	5.36	5.29	5.25	5.3	5.38	5.29	5.27
EFICIENCIA DE REMOCIÓN SSV (%)	26.71	22.22	24.25	23.23	24.03	21.58	23.18	22.18
EFICIENCIA DE REMOCIÓN DQOT (%)	22.62	20.31	21.11	19.19	20.13	19.06	18.40	17.43
EFICIENCIA DE FORMACIÓN DQOS (%)	21.41	16.05	19.35	17.15	19.71	15.85	18.13	16.23

EV+LA= Estiércol de vaca con lodo acidogénico  
 EV+LM= Estiércol de vaca con lodo metanogénico  
 LA+LA= Lodo acidogénico con lodo metanogénico.  
 EV+LA+LM= Estiércol de vaca, lodo acidogénico y metanogénico.

### 3.3.2 AGV y biogás (CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>)

**Tabla 3.8** Eficiencia de formación de AGV y composición del biogás en las cinéticas de mezclas de inóculos

RELACIÓN LP/LS	70/30				50/50			
PARAMETRO	EV+LA	EV+LM	LA+LM	EV+LA+LM	EV+LA	EV+LM	LA+LM	EV+LA+LM
% EFICIENCIA DE FORMACIÓN AGV	88.45	68.48	66.74	79.83	82.64	64.28	71.89	76.12
COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> (%)	20-80	33-67	23-77	26-74	23-77	32-68	22-78	25-75

En la tabla 3.8 se observa que la mayor formación de AGV se da en lodos con EV + LA en ambas proporciones (70/30 y 50/50), con un 88.45 y 82.64% cada uno, este resultado es mayor a lo obtenido por Tsakou y col (2000) en un sistema acidogénico-termofílico a 56 °C con un 53.3% en la formación de AGV y a la obtenida por Shana y Assadi (2002) con una formación del 73% de éstos. Lo que confirma que la mezcla de estos inóculos mejora la hidrólisis de los lodos, que cuando se utilizan por separado. Lo anterior se confirma en la figura 3.7 de la producción total de AGV.

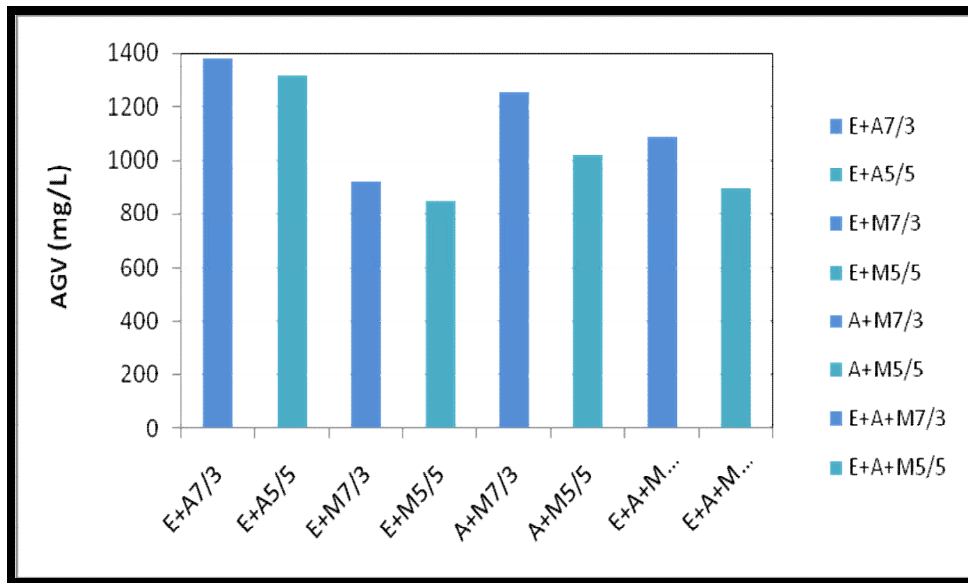


Figura 3.7 Producción de AGV en las cinéticas de mezclas de inóculos.

En la figura 3.8 La mayor producción de biogás se da en la mezcla de los tres inóculos (EV + LA + LM), Aunque la mayor concentración de CO<sub>2</sub> en el biogás producido se observa en la mezcla EV y LA, en un rango de 79% de CO<sub>2</sub> y 21% de CH<sub>4</sub>, favoreciendo la etapa acidogénica

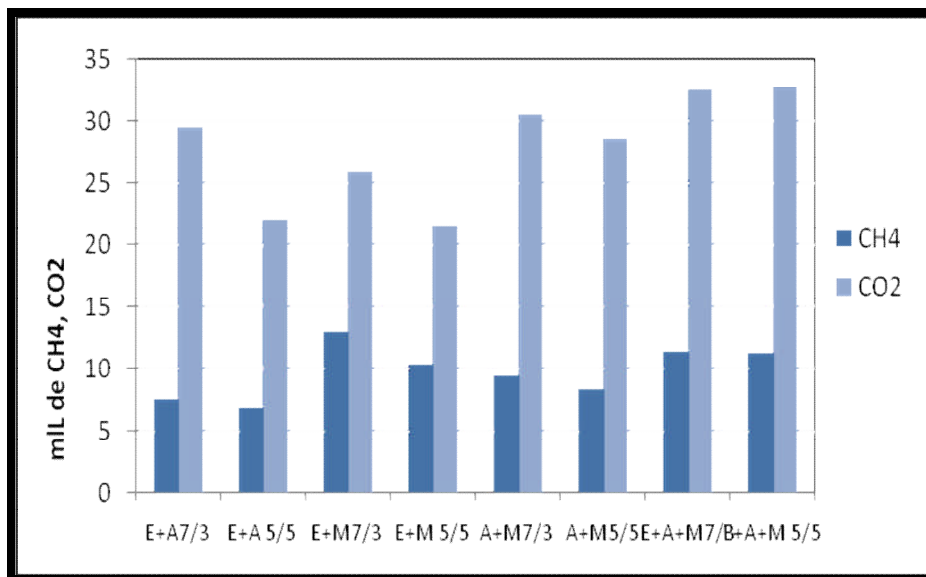


Figura 3.8 Producción de biogás en las cinéticas de mezclas de inóculos



### 3.4 HIDRÓLISIS Y ACIDOGÉNESIS EN UN REACTOR UASB

El segundo objetivo de este trabajo fue el montaje y operación de un reactor UASB para la remoción de lodos residuales con el inóculo mas apropiado.

Según los resultados obtenidos en las cinéticas en lote, el reactor debió haber sido inóculado con EV + LA, con una relación de LP/LS de 70/30, pero no hubo mucha diferencia en los resultados entre estos con el LA y la relación LP/LS de 50/50, ya que esta composición es la que más se acerca a la proporción que se producen en las plantas de tratamiento, por tal motivo se decidió trabajar con estas últimas condiciones de inóculo y proporción de lodos. Las condiciones de operación del reactor se muestran en la sección 2.11.

Cada lote alimentado al reactor fue caracterizado, esta composición se muestra en la Tabla 3.9. Cabe destacar que el pH de entrada al reactor fue ajustado a valores de 5, con el fin de inducir la hidrólisis y acidogénesis de éstos, ocupando un volumen promedio de 2.2 mL de Hcl / L alimentación.

**Tabla 3.9** Composición de la mezcla de lodo (alimentación)

PARÁMETRO	ALIMENTACIÓN LP/LS DE 50/50
PH	5 ± 0.02
Sólidos Totales "ST" (g/L)	8.04±2.3
Sólidos Volátiles "SV" (g/L)	5.35 ± 3.4
Sólidos suspendidos Totales "SST" (g/L)	6.11 ± 1.3
Sólidos suspendidos Volátiles "SSV" (g/L)	3.73± 2.0
DQO total "DQOT" (g/L)	8.39± 5
DQO soluble "DQOS" (g/L)	3.01± 0.3
AGV (mg/L)	400±51

Para fines de tener variables controladas, en el experimento únicamente se vario el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) del reactor, y así con esto observar en que TRH se obtiene una mejor hidrólisis de lodos residuales. La variación del TRH se muestra en la Tabla 3.10.

#### 3.4.1 Purga de lodos

A lo largo de la operación del reactor se realizaron cuatro purgas, debido a que el reactor UASB trabajó sin agitación y hubo una acumulación de lodo, estas purgas podrían afectar directamente al tiempo de retención de sólidos (TRS), el cual se muestra en la tabla 3.10, donde se observa la cantidad de lodo sedimentado que fue en promedio de 2.5 mL/día independiente del TRH.

**Tabla 3.10** Variación del TRH y TRS en el reactor UASB

Días de operación	TRH (días)	TRS (días)	Volumen de lodo purgado (mL)
40	8	39	110
73	6	30	150
42	5	22	120
55	4	17	135
43	3	15	120
<b>Total: 253</b>			<b>Total: 635</b>

### 3.4.2 Velocidad y eficiencia de hidrólisis

Como ya se mencionó en este trabajo, la hidrólisis es el primer paso para la digestión anaerobia de sustratos orgánicos complejos, por lo que se define como la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos como los lodos residuales.

La velocidad y la eficiencia de hidrólisis son dos parámetros que nos ayudan a observar el grado de hidrólisis ocurrido en el reactor UASB, los cuales se muestran en la tabla 3.11, donde se observa una mayor velocidad de hidrólisis y una eficiencia de ésta cuando el reactor trabajó a un TRS de 17 días, con 0.157 gSSV / Ld y 57.24 % respectivamente.

Tabla 3.11 Velocidad y eficiencia de hidrólisis en el reactor UASB

TRS (días)	Velocidad de hidrólisis (g SSV / L d)	Eficiencia de Hidrólisis (%)
39	0.058	46.11
30	0.072	49.22
22	0.104	49.14
17	0.157	57.24
15	0.150	48.71

El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de muchos factores, entre otros del pH, de la temperatura, de la concentración de biomasa hidrolítica, del tipo de materia orgánica particulada, en la figura 3.9 se observa la velocidad de hidrólisis para cada tiempo de retención de sólidos trabajados en el reactor. Los resultados muestran que a menores tiempos de retención de sólidos hay una mayor velocidad de hidrólisis.

De la misma manera se puede ver que la eficiencia de hidrólisis se mantiene en un rango de 46 a 57 %, independientemente del TRS, es decir, el sistema no removerá más materia orgánica aunque se aumente la permanencia de los sólidos en el reactor por lo que es recomendable trabajar a TRS bajos, menores a 20 días.

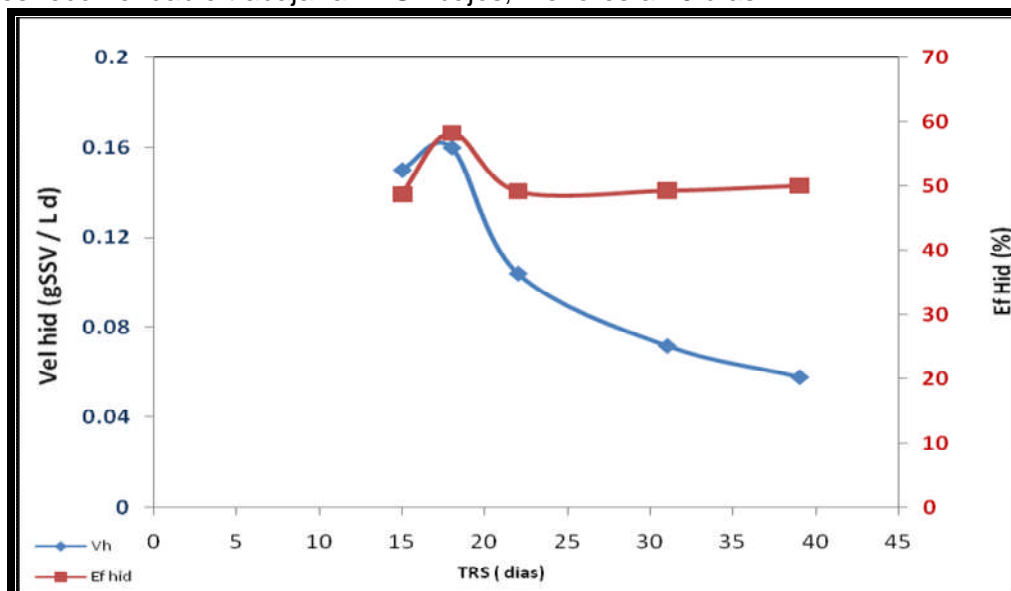


Figura 3.9 Velocidad y eficiencia de hidrólisis a cada TRS en el reactor UASB

### 3.4.3 pH

En la Tabla 3.12 se muestra la evolución del pH a lo largo del experimento, el cual se mantiene en valores favorables para la acidogénesis, con un promedio de 5.08 en la etapa con TRH de 4 días y el promedio más alto que se encontró fue con un TRH de 8 días con 5.21. Cabe destacar que el pH de los lodos de alimentación se ajustaron a 5.0 para inducir una acidogénesis, ya que las bacterias acidogénicas se mantienen activas a pH que oscilan de 4.5 a 5.5; de esta forma puede ocurrir la inactivación de las bacterias metanogénicas (pH de 6.8 a 7.2) y acidificarse mejor el reactor (Montalvo 2003).

Tabla 3.12 Eficiencia de los parámetros evaluados en los diferentes tiempos de retención.

PARAMETRO	EFICIENCIA DE REMOCION DE SSV, DQOT, SSV Y FORMACION DE DQOs				
	8	6	5	4	3
TRH (DIAS)	8	6	5	4	3
PH	5.21	5.15	5.10	5.08	5.11
EFICIENCIA DE REMOCIÓN SSV (%)	45.02	50.54	48.67	58.22	48.20
EFICIENCIA DE REMOCIÓN DQOT (%)	33.79	26.56	23.35	39.65	19.54
EFICIENCIA DE FORMACIÓN DQOs (%)	28.49	18.59	20.50	37.58	18.57

### 3.4.4 Demanda química de Oxígeno Soluble

La figura 3.10 muestra el grado de hidrólisis de la materia orgánica en términos de DQO soluble de acuerdo a la carga orgánica alimentada. El reactor operó durante todo el experimento con una concentración de sólidos totales de 8 g/l y una proporción de LP/LS de 50/50, variando únicamente el tiempo de retención hidráulica (TRH). Se observa una mayor formación de DQO soluble en la etapa cuando el reactor está con un TRH de 4 días, la eficiencia de hidrólisis en esa etapa fue de 37.58%. Esta eficiencia se puede comparar con lo encontrado por Kim y col (2003) en la digestión anaerobia mesofílica y termofílica a un pH de 5 y TRS de 20 días con un lodo sintético con una eficiencia de 30.9% de formación de DQO soluble.

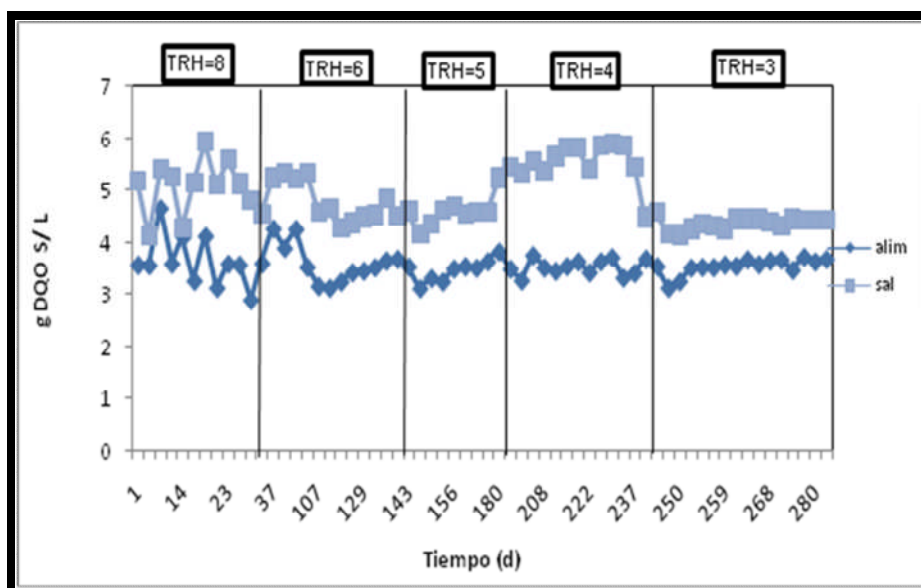


Figura 3.10 Formación de DQO soluble en el reactor acidogénico.

### 3.4.5 Sólidos suspendidos volátiles

La Figura 3.11 presenta la eficiencia de remoción de SSV, donde se observó el mejor resultado con un TRH de 4 días con un 58.22% que es ligeramente mayor a la obtenida con un TRH de 8 días con un 45.02%, solo que a tiempos largos de TRH se favorece la etapa metanogénica. Tanaka y col. (1992), Vigueras (2002), obtuvieron una eficiencia de 45 y 43% de destrucción de SSV respectivamente empleando métodos fisicoquímicos. La concentración de sólidos y el TRH juegan un papel importante para desarrollar adecuadamente la acidogénesis, al operar a un TRH bajo y cargas elevadas de sólidos un reactor pierde la capacidad de destrucción de SSV. (Castillo y col 1999).

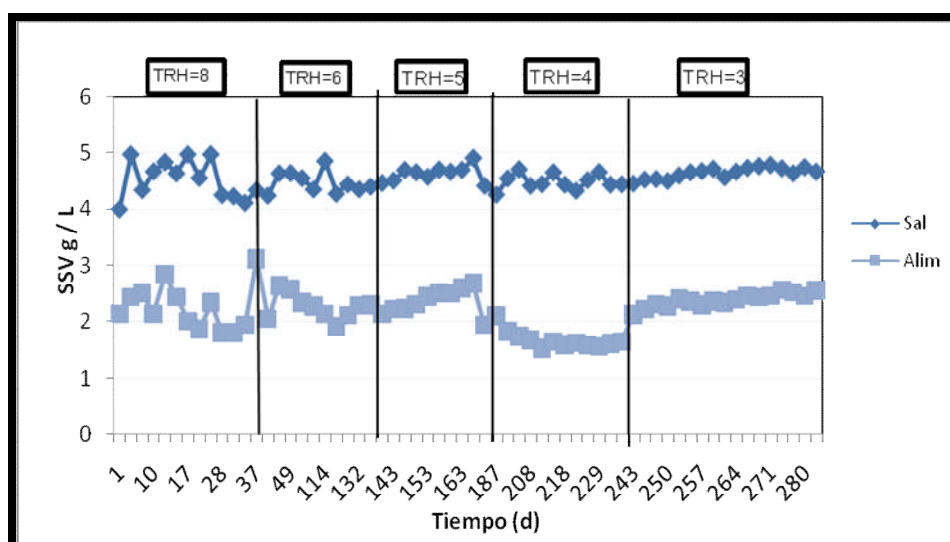


Figura 3.11 Remoción de SSV en el reactor acidogénico.

### 3.4.6 Ácidos Grasos Volátiles y Producción de Biogás (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>)

En la Figura 3.12 se observa la formación total de AGV en el reactor acidogénico, donde se observa que se hay una mayor formación de estos ácidos (acético, propiónico, butírico, isobutírico) en un TRH de 4 días, con una eficiencia de formación de 33.03% en comparación con los otros tiempos de retención probados, como en el TRH de 8 días de 25.44%. (Tabla 3.13).

Del 33.03% de formación el 37% corresponde a acetato, el 31% a propiónico, 17% a butírico y 15% a isobutírico. Estos resultados son menores a los obtenidos por Tsakuo y col. (2000) quienes reportaron un 53% de formación de AGV, y al reportado por Shana y Assadi (2002), quienes reportaron una formación de 73% de AGV en un reactor acidogénico semicontinuo a 35°C

En la Figura 3.12 se observa muy poca diferencia (excepto en el TRH de 4 días) entre la producción de AGV y la variación del TRH, ya que dicha concentración debe aumentar conforme disminuye el TRH del reactor, según lo comentan Castillo y col (1999) que observaron que la producción neta de AGV disminuye con el aumento del TRH y de la temperatura en un reactor de biopelícula de lecho sumergido.

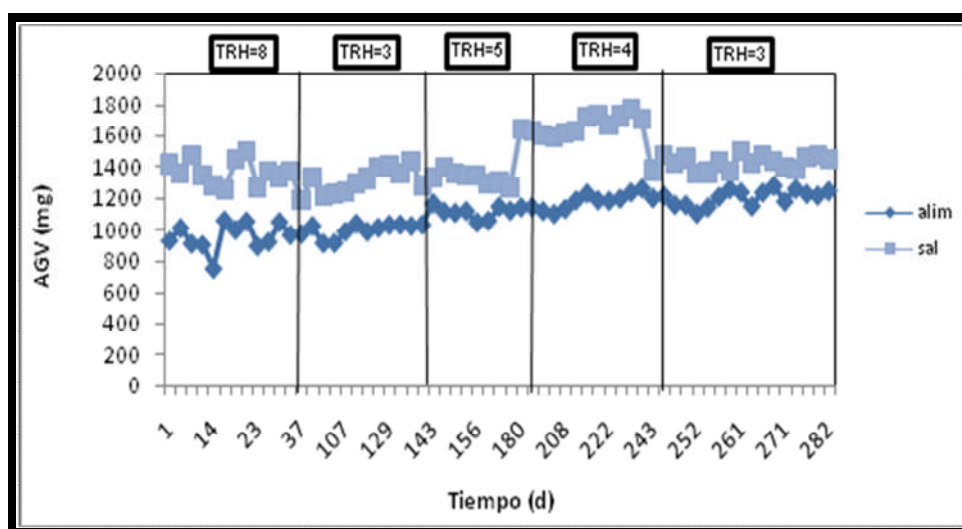


Figura 3.12 Formación de AGV en el reactor acidogénico.

Tabla 3.13 Eficiencia de formación de AGV y producción de biogás en los diferentes tiempos de retención.

PARAMETRO	EFICIENCIA DE FORMACIÓN DE AGV Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> )				
	8	6	5	4	3
TRH (DIAS)	8	6	5	4	3
EFICIENCIA DE FORMACIÓN. AGV (%) ACETATO, PROPIONATO, ISOBUTIRATO, BUTIRATO	25.44	21.92	17.44	33.07	19.02
PRODUCCIÓN DE CH <sub>4</sub> (mL)	21.75	7.0	9.91	16.53	20.02
PRODUCCIÓN CO <sub>2</sub> (mL)	51.34	19.75	28.54	52.86	52.13
COMPOSICIÓN BIOGÁS CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> (%)	66-34	74-26	74-26	76-24	66-34

La figura 3.13 muestra la producción de biogás en el reactor acidogénico a lo largo del experimento, donde se observa que no hubo una diferencia significativa en la producción de biogás entre el TRH de 8 días, y el de 4 días, pero la composición cambio de 34-66 % y de 76-24% de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub>, respectivamente para cada TRH, lo que indica una acidogénesis mayor en el reactor con 4 días de tiempo de retención.

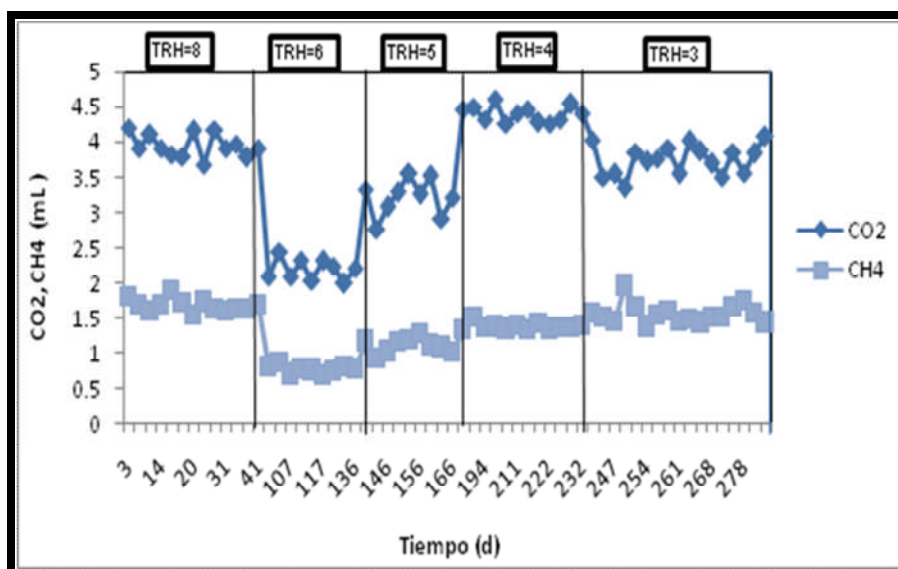


Figura 3.13 Producción de biogás en el reactor acidogénico.

# CAPITULO

## 4

# CONCLUSIONES

## y

# RECOMENDACIONES

---

*"Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios"*

*J.B.J. José Miguel Guzmán Luis*

## 4.1 CONCLUSIONES

- De acuerdo a las eficiencias de remoción de sólidos suspendidos volátiles y de formación de DQO soluble, la mejor relación o proporción de lodos primarios/secundarios resulto ser de 70/30.
- En las cinéticas en lote, los mejores resultados están en la mezcla: estiércol de vaca con lodo acidogénico. Ya que ésta presenta un aumento en la destrucción de sólidos suspendidos volátiles (SSV) y se observa una mayor formación de DQOs, una mayor producción de CO<sub>2</sub> en comparación con el CH<sub>4</sub> producido y una mayor generación de AGV, lo que es un indicativo importante de que hubo una buena la hidrólisis de materia orgánica en los lodos.
- La presencia del lodo metanogénico aumenta el pH y favorece la producción de CH<sub>4</sub>.
- En el reactor acidogénico UASB, la mejor eficiencia de hidrólisis se obtuvo cuando se trabajó a un TRH de cuatro días y a un TRS de 17 días.
- La velocidad de hidrólisis y el TRS juegan un papel importante en el desarrollo de la digestión anaerobia ya que a tiempos largos se favorece la etapa metanogénica y a tiempos cortos, se favorece la hidrólisis y acidogenesis.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Para un estudio posterior de lodos residuales por medio de la digestión anaerobia en dos etapas seria recomendable trabajar la hidrólisis y acidogénesis de manera termofílica, con el propósito de tener una eficiencia y velocidad de hidrólisis mayor a las reportadas.
- También se sugiere manejar tiempos de retención hidráulica y de sólidos (TRH y TRS) cortos, debido a que la eficiencia de hidrólisis no varía de manera considerable a tiempos largos de residencia de sólidos.



## BIBLIOGRAFÍA

- Ağdağ O. and Sponza D. 2005. Co-digestion of industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling reactors. *Process Biochemistry*, 40, 1.871-1.879.
- Anise, U.A. and Darwin, L.S. (1995). Kinetics of pathogen destruction during storage of dewatered biosolids. *Waste Environmental Res.*, 67;143-149.
- APHA, AWWA, WPCF (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. 17 th. Ed. Am. Pub. Health Assoc., USA.
- Cabirol N., Rubio L, Monter L., Loyola A. (2005). Digestión anaerobia en dos fases termofílica/mesofílica para la producción de biosólidos clase A. UNAM D.F.
- Campos E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. España.
- Castillo de Castro, P., González Guarocuya e Tejero Iñaki (1999), prefermentación de agua residual urbana empleando un reactor biopelícula de lecho sumergido, *Ingeniería del Agua*. Vol.6 Num.3 (septiembre 1999), páginas 259-268
- Comisión Nacional del Agua; Estadísticas 1995, 2003, 2005.
- De la Rubia A; Pérez M; Romero L. I; Sales D. (2001) Ácidos grasos volátiles en lodos de depuradora. Efecto de la temperatura Dpto. de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Cádiz. España.
- Eastman, J.A. and Ferguson, J.F. (1981). Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. *Journal WPCF*. 53 (3), pp. 352-366.
- Elefsiniotis, P. and Oldham, W. K. (1991). The effect of operational parameters on the acid phase anaerobic fermentation in the biological phosphorus removal process. *Proceedings ASCE NATL Conf. on Environmental Engineering*. pp. 325-330.
- Huyard, A, Ferran, B and Audie, J.M. (2000). Two phase anaerobic digestion process: sludge stabilization and pathogens reduction. *Water science & Technology*, 42 (9): 41-47.

- Iza J. (1989) El control de la operación de los digestores anaerobios de aguas residuales. En Digestión Anaerobia de la aguas residuales. Ed. F. Fdz.-Polanco, universidad de Valladolid España.
- Gujer W., and Zehnder A.J.B. (1983). "Conversion processes in anaerobic digestion". Water Science. Technology. 15: 127-167.
- Metcalf y Eddy, INC., (1996) Ingeniería de aguas residuales, tratamiento y vertido y reutilización, Ed. Mc GRAW-Hill, Trad. Trillo M.J. de D. y Trillo F. I.
- Milenko Roš and Gregor Drago Zupančič, (2003); Aerobic thermophilic stabilization and degradation of waste activated sludge from wastewater treatment plant, National Institute of Chemistry, Hajdrihova Ljubljana, Slovenia.
- Monsey F. (1983) Mathematical modeling of the anaerobic process: regulatory mechanism for the formation of short chain volatile acids from glucose. Water science and technology, 15 8/9: 209-232.
- Montalvo S. y Guerrero L. (2003) Tratamiento anaerobio de residuos., Universidad Técnica Federico Santa Maria, Chile.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.
- Noyola A. (2005) Estimulación de la digestión anaerobia termofílica de lodo fisicoquímico por medio de aditivos enzimáticos y micronutrientes Instituto de Ingeniería Coordinación de Bioprocesos Ambientales, UNAM, D.F.
- Sabando F. y Del castillo (2002). Estabilización de mezclas de lodos de pisciculturas y estiércol de vaca por medio de co-digestión anaerobia-Universidad católica de Temuco, Temuco Chile.
- Shana and assadi (2002) Acid phase digestion pre-treatment and its impact on conventional mesophilic anaerobic digestion. Thesis.
- Skalsky, D. S. and Daigger, G. T. (1995). Wastewater solids fermentation for volatile acid production and enhanced biological phosphorus removal. Water Environment Research. 67 (2), págs. 230-237.
- Tanaka S. Kobayashi T., Kamiyama K and Signe Y. (1992) Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge. Water Science and technology.
- Tsakou S., Kenso K. and Yoshikasu N. (2000). Anaerobic waste activated sludge digestion a bioconversion mechanism and Kinetic model. Biotechnology and bioengineering.

- Torres G. y Zarate V. (1997). Factibilidad de tratamiento y disposición de lodo residual de una planta de tratamiento de aguas residuales en el Edo de Nuevo León México. Water Environment Federation, 70th annual Conference y Exposition Chicago Illinois.
- Kim, M., Ahn, Y.H., and Speece, R.E. (2002). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. Water Res., 36(17), 4369-4385.
- Van Lier J.B. (1996). Limitation of thermophilic anaerobic wastewater treatment and the consequences for process design. Antonie van Leeuwenhoek, 69, 1–1.
- Viguera S. (2002) Digestión anaerobia en una y dos etapas de lodos residuales secundarios pre-tratados químicamente. Tesis de maestría, UAM Iztapalapa, México D.F
- Yue H., SPNG S. and Dague R. (1995), Temperature-phased anaerobic digestion of wastewater sludge. En: Proc 8<sup>th</sup> International Conference on Anaerobic Digestion, Vol. 1.
- Zabranska, J., Stepova J., Wachtl R., Jenicek P. and Dohanyos M. (2000). The activity of anaerobic biomass in thermophilic and mesophilic digesters at different loading rates. Water Sci. Technol. , 32, 49-56.
- Zinder, S.H. (1986). Thermophilic waste treatment systems. In Brock TD, editor. Thermophiles: general molecular and applied biology. New York: Wiley Interscience, 257-277.

# ANEXOS

---

*"Efectos de diferentes fuentes de inóculo en la hidrólisis y acidogénesis de lodos primarios y secundarios"*

*J.B.J. José Miguel Guzmán Luis*

### A1 ELIMINACIÓN DE DQO<sub>T</sub> Y FORMACIÓN DE DQO<sub>S</sub>, AGV, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> EN LA RELACIÓN LP/LS DE 70/30 Y 50/50

En las tablas A1 Y A3 se muestran los resultados de la DQO<sub>T</sub> eliminada, y la DQO<sub>S</sub> formada en la cinéticas en las relaciones, en la proporción LP/LS de 70/30, en la que se presentan los mejores resultados en las cinéticas y la relación 50/50, que es la proporción en la cual se generan los lodos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

En la tabla A1. los mejores resultados se muestran en la cinética con lodo acidogénico, en donde se observa que de la DQO<sub>T</sub> eliminada experimental (1931.00mg/L) ,de la cual 615 mg/L se convirtió en DQO<sub>S</sub>, es decir, en AGV (donde se formaron 580.02 mg/L de éstos) y otros productos , lo que demuestra que se favoreció la etapa acidogénica, en lo que se refiere a la cinética con lodo metanogénico de la DQO<sub>T</sub> eliminada experimental (1045.16mg/L), donde se convirtió 191 mg/L DQO<sub>S</sub>.

Algo similar ocurrió en la relación LP/LS de 50/50 (Tabla A3), en donde de la DQO<sub>T</sub> eliminada experimental (1735.46 mg/L), 877.8 mg/L se convirtió en DQO<sub>S</sub>, de la cual se formaron 470.46 mg/L de AGV.

La tabla A2 y A3 se muestran los resultados de entrada y salida de la DQO<sub>T</sub>, DQO<sub>S</sub>, AGV CH<sub>4</sub> Y CO<sub>2</sub> en las cinéticas en lote en las relaciones LP/LS de 70/30 7 50/50.

**Tabla A1** DQO<sub>T</sub> eliminada y formación DQO<sub>S</sub>, en la relación LP/LS de 70/30

LP/LS =70/30	DQO <sub>T</sub> ELIMINADA	DQO <sub>S</sub> FORMADA
CINETICAS	EXPERIMENTAL (mg/L)	EXPERIMENTAL (mg/L)
Sin inóculo	1037.21	461.1
E. de vaca	1368.35	551.06
L. acidogénico	1931.00	525.4
L.metanogénico	1045.16	185.2

**Tabla A2** Resultados de entrada y salida de los parámetros evaluados en las cinéticas

CINETICAS LP/LS =70/30	DQO <sub>T</sub> ENTRADA mg/L	DQ <sub>T</sub> SALIDA mg/L	DQO <sub>S</sub> ENTRADA mg/L	DQO <sub>S</sub> SALIDA mg/L	AGV ENTRADA mg/L	AGV SALIDA mg/L	CH <sub>4</sub> SALIDA mL	CO <sub>2</sub> SALIDA mL
Sin inóculo	9429.0	8392.2	3746.1	4207.2	136.44	351	8.18	15
E. de vaca	12000.1	10631.0	3998.4	4549.0	233.35	451.98	7.51	18.48
L. acidogénico	10005.6	8060.7	2540.1	3065.5	302.83	580.02	11.70	32.29
L.metanogénico	9323.5	8281.4	2542.1	2727.3	85.48	155.82	25.06	11.93

**Tabla A3** DQO<sub>T</sub> eliminada y formación DQO<sub>S</sub>, en la relación LP/LS de 70/30

LP/LS =50/50	DQO <sub>T</sub> ELIMINADA	DQO <sub>S</sub> FORMADA
CINETICAS	EXPERIMENTAL (mg/L)	EXPERIMENTAL (mg/L)
Sin inóculo	874.4	351.25
E. de vaca	1085.92	688.8
L. acidogénico	1735.46	877.8
L.metanogénico	904.64	274.7

**Tabla A4** Resultados de entrada y salida de los parámetros evaluados en las cinéticas

CINETICAS LP/LS =50/50	DQO <sub>T</sub> ENTRADA mg/L	DQ <sub>T</sub> SALIDA mg/L	DQO <sub>S</sub> ENTRADA mg/L	DQO <sub>S</sub> SALIDA mg/L	AGV ENTRADA mg/L	AGV SALIDA mg/L	CH <sub>4</sub> SALIDA mL	C <sub>2</sub> SALIDA mL
Sin inóculo	8791.2	7920.5	3919.4	4270.6	120.01	346.29	7.306	12.493
E. de vaca	10853.4	9764.1	7120.0	6431.2	178.7	430.0	5.9	14.1
L. acidogénico	9891.2	8158.5	5496.8	4619.5	231.55	470.46	10.101	26.899
L.metanogénico	9492.6	8592.1	3.3827	3.11	71.95	101.62	19.383	9.616

## A2 ELIMINACIÓN DE DQO<sub>T</sub> Y FORMACIÓN DE DQO<sub>S</sub>, AGV, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> EN LA RELACIÓN LP/LS DE 70/30 Y 50/50

En las tablas A5 Y A7 se muestran los resultados de la DQO<sub>T</sub> eliminada, y la DQOs formada en la en las cinéticas de mezclas de inóculos LP/LS de 70/30 y 50/50.

En la tabla A5. los mejores resultados se muestran en la cinética con estiércol de vaca y lodo acidogénico, en donde se observa que de la DQO<sub>T</sub> eliminada experimental (2783.26 mg/L) ,de la cual 1685.8 mg/L se convirtió en DQO<sub>S</sub>, es decir, en AGV (donde se formaron 790.75 mg/L de éstos) y otros productos, lo que demuestra que se favoreció la etapa acidogénica.

En lo que se refiere algo a la relación LP/LS de 50/50 (Tabla A7), en donde de la DQO<sub>T</sub> eliminada experimental (2232.81 mg/L), 1290.01 mg/L se convirtió en DQOs, de la cual se formaron 656.1 mg/L de AGV.

**Tabla A5** DQO<sub>T</sub> eliminada y formación DQO<sub>S</sub>, relación LP/LS de 70/30

LP/LS =70/30	DQO <sub>T</sub> ELIMINADA	DQO <sub>S</sub> FORMADA
CINETICAS	EXPERIMENTAL (mg/L)	EXPERIMENTAL (mg/L)
EV + LA	2783.26	1685.8

**Tabla A6** Resultados de entrada y salida de los parámetros evaluados en las cinéticas de mezcla de inóculos

CINETICAS LP/LS =70/30	DQO <sub>T</sub> ENTRADA mg/L	DQ <sub>T</sub> SALIDA mg/L	DQO <sub>S</sub> ENTRADA mg/L	DQO <sub>S</sub> SALIDA mg/L	AGV ENTRADA mg/L	AGV SALIDA mg/L	CH <sub>4</sub> SALIDA mL	C <sub>2</sub> SALIDA mL
EV + LA	12301.2	9523.1	3445.4	5181.2	371	790.75	7.515	29.485

**A7** DQO<sub>T</sub> eliminada y formación DQO<sub>S</sub>, relación LP/LS de 50/50

LP/LS =50/50	DQO <sub>T</sub> ELIMINADA	DQO <sub>S</sub> FORMADA	
CINETICAS	EXPERIMENTAL (mg/L)	EXPERIMENTAL (mg/L)	AGV (mg/L)
EV + LA	2232.81	1290.01	656.1

**Tabla A8** Resultados de entrada y salida de los parámetros evaluados en las cinéticas de mezcla de inoculos

CINETICAS LP/LS =50/50	DQO <sub>T</sub> ENTRADA mg/L	DQ <sub>T</sub> SALIDA mg/L	DQO <sub>s</sub> ENTRADA mg/L	DQO <sub>s</sub> SALIDA mg/L	AGV ENTRADA mg/L	AGV SALIDA mg/L	CH <sub>4</sub> SALIDA mL	CO <sub>2</sub> SALIDA mL
EV + LA	10991.4	8762.6	5263.4	6551.4	244.4	656.1	6.829	22.075

### A3 ELIMINACIÓN DE DQO<sub>T</sub> Y FORMACIÓN DE DQO<sub>s</sub>, AGV, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> EN EL REACTOR ACIDOGÉNICO

**Tabla A9** DQO<sub>T</sub> eliminada y formación DQO<sub>s</sub>,

	DQO <sub>T</sub> ELIMINADA	DQO <sub>s</sub> FORMADA
TRH	EXPERIMENTAL (mg/L)	EXPERIMENTAL (mg/L)
8	1499.76	1372.94
6	1017.88	1000.04
5	1156.22	1103.20
4	2225.19	1532.43
3	1123.82	1001.20

**Tabla A10** Resultados de entrada y salida de los parámetros evaluados en el reactor acidogénico

TRH	DQO <sub>T</sub> ENTRADA mg/L	DQ <sub>T</sub> SALIDA mg/L	DQO <sub>s</sub> ENTRADA mg/L	DQO <sub>s</sub> SALIDA mg/L	AGV ENTRADA mg/L	AGV SALIDA mg/L	CH <sub>4</sub> mL	CO <sub>2</sub> mL
8	5719.4	4219.2	3699.75	5072.70	944.1	926.0	51.35	21.75
6	5500.3	4482.5	3690.25	4690.34	893.5	864.9	19.77	6.93
5	5620.7	4464.3	3982.57	5085.78	951.5	829.1	28.88	9.92
4	5692.6	3466.5	4087.73	5620.17	969.2	1029.0	52.86	16.54
3	5596.9	4472.1	3362.56	4363.76	945.1	827.4	63.59	26.41

En la tabla A10 se muestran los resultados de la formación de DQO<sub>T</sub>, así como la formación de DQOs en el reactor acidogénico, donde los mejores resultados se muestran con un TRH de 4 días, en donde se observa que de la DQO<sub>T</sub> eliminada experimental (2225.19 mg/L), de la cual 1532 mg/L se convirtió en DQO<sub>s</sub>, es decir, en AGV (donde se formaron 1029.0 mg/L, que es la máxima formación de éstos en todos los TRH probados en el experimento) y otros productos, lo que demuestra que se favoreció la etapa acidogénica.