



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ARRANQUE DE UN DIGESTOR DE LODOS A NIVEL
PILOTO BASADO EN EL CONCEPTO
DE LECHO DE LODOS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JOSÉ ANTONIO BAHENA HERNÁNDEZ

TUTOR:

DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

Ciudad Universitaria 2007



JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: M. I. MANUEL DAVID HEREDIA DURAN
VOCAL: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES
SECRETARIO: M. I. VICTOR FRANCO
1er SUPLENTE: ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ
2do SUPLENTE ING. LORENZO OCTAVIO MIRANDA CORDERO

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM
PTAR CERRO DE LA ESTRELLA, SACM

TUTOR DE TESIS

DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

Reconocimientos

A mis padres, Teodoro Bahena y
María Hernández por la labor titánica
Y extraordinaria con todos nosotros
a pesar de las limitaciones. Papá, mamá
mi reconocimiento y admiración.
Son un ejemplo a seguir

A la Universidad Nacional Autónoma de México.
Es la mejor institución educativa de Latinoamérica
y un espacio maravilloso de formación académica,
cultural y humana. Es maravilloso estar en ella.
Es extraordinaria

A la Buena Voluntad de todos aquellos que
me ayudaron a disfrutar mi estancia en la
Universidad. Su paciencia, sus experiencias
extraordinarias compartidas, y su disposición
infinita para servir al los demás son un ejemplo
a seguir

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido disfrutar y concluir esta etapa de mi vida. Gracias Dios, y permite que esto sea para servir.

A mis Padres, Teodoro Bahena Bustos y María Hernández Rodríguez por todo el apoyo incondicional que me han brindado, esta va por ustedes.

A mis hermanos, Oscar, Edgar, Hugo, Arcadio y Julio por los momentos juntos y las enseñanzas. Gracias por todo.

A Dulce Merari, por todo el amor, apoyo y paciencia que me has tenido todo este tiempo juntos, gracias mi amor.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que en sus aulas, jardines, museos, bibliotecas, laboratorios y teatros me formé como ingeniero y principalmente como persona. Fueron años muy felices. Soy muy afortunado.

Al Buena Voluntad por enseñarme a disfrutar la vida, siempre estaré agradecido con ustedes. Sin su ayuda no lo hubiera logrado.

A todos los camaradas de la facultad, bien por ustedes.

A Abril Moreno y Miguel Herrera por los buenos momentos con Dulce y conmigo. El paso por el Instituto no hubiera sido tan agradable sin ustedes

A toda la banda del Instituto, gracias totales.

Al Ing. Roberto Briones por todo el apoyo brindado y la experiencia en el campo de la digestión anaerobia que muy amablemente compartió conmigo.

Al Dr. Adalberto Noyola por la confianza y el conocimiento compartido durante este trabajo.

A Margarita Cisneros por las facilidades otorgadas para que se pudiera llevar a cabo este trabajo

Al Instituto de Ingeniería por el apoyo y la infraestructura

Al Sistema de Aguas de la Ciudad de México por haber permitido que se llevara parte de este trabajo en sus instalaciones.

A la Dirección General de Asuntos de Personal Académico, DGAPA, por proporcionar el financiamiento para que se llevara a cabo este proyecto

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Particulares	3
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Lodos de desecho y su tratamiento	4
3.1.1 <i>Lodos primarios y biológicos</i>	4
3.1.2 <i>Lodos fisicoquímicos</i>	5
3.2 Operaciones y procesos de tratamiento de lodos de desecho	5
3.2.1 <i>Espesamiento</i>	6
3.2.2 <i>Estabilización</i>	7
3.2.3 <i>Deshidratación</i>	10
3.3. Disposición final	12
3.4 Digestión anaerobia	15
3.4.1 <i>Aspectos bioquímicos y microbiológicos</i>	15
3.4.2 <i>Factores ambientales</i>	18
3.5 Digestores anaerobios de lodos	19
3.5.1 <i>Diseño de digestores anaerobios</i>	21
3.5.2 <i>Geometría de digestores anaerobios convencionales de lodos</i>	23
3.5.3 <i>Equipos de procesos</i>	25
3.5.4 <i>Producción y manejo del biogás</i>	29
3.6 Espumas y natas en digestores anaerobios	29
3.6.1 <i>Teoría de la formación de espuma</i>	30
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	32
4.1 Descripción del prototipo	32
4.2 Parámetros de control y respuesta	36
4.3 Metodología de muestreo	36
4.4 Técnicas analíticas	37
4.5 Evaluación y control de espumas y natas	37
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES	41
5.1 Influyente	41
5.1.1 <i>Sólidos suspendidos</i>	41
5.1.2 <i>Carga orgánica alimentada</i>	45
5.1.3 <i>Relación de alcalinidades y pH</i>	46
5.2 Sobrenadante	48
5.2.1 <i>Relación de alcalinidades y pH</i>	50
5.3 Lodos contenidos en el digestor	52
5.3.1 <i>Sólidos suspendidos</i>	52
5.3.2 <i>Altura de la cama y temperatura</i>	54
5.3.3 <i>Índice Volumétrico y Velocidad de Sedimentación</i>	56
5.4 Espumas y natas	57
5.5 Balance de masa	63
5.6. Porcentaje de reducción de sólidos suspendidos con base en las concentraciones promedio	66
5.7 Análisis técnico-económico del digestor tipo UASB y comparado con otra tecnología	67
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
6.1 Conclusiones	71
6.2 Recomendaciones	72
BIBLIOGRAFÍA	73

ANEXO 75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Intervalo de valores de la composición físicoquímica típica de los lodos primario y secundario. (Metcalf and Eddy, 2003)..... 5

Tabla 3-2. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia y aerobia de lodos 8

Tabla 3-3. Comparación de los diferentes métodos de estabilización de lodos 10

Tabla 3-4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos 13

Tabla 3-5. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM-SEMARNAT-2002). 14

Tabla 3-6. Aprovechamiento de biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002). 14

Tabla 3-7. Tiempos de retención celular para el diseño de digestores de lodos completamente mezclados Lodos al 4% como mínimo (Metcalf & Eddy, 2003)..... 22

Tabla 3-8. Efecto de la concentración de sólidos y el tiempo de retención sobre la carga orgánica en digestores anaerobios (Metcalf and Eddy, 2003)..... 22

Tabla 3-9. Condiciones ambientales y de operación durante la digestión anaerobia de lodos de purga (Malina y Pohland, 1992). 23

Tabla 4-1. Parámetros para el monitoreo del funcionamiento del Digestor 37

Tabla 5-1. Resultados de la evaluación económica entre el proceso convencional y el proceso no convencional (Pérez, 2004). 68

Tabla 5-2. Matriz comparativa. Proceso convencional y proceso no convencional (Pérez, 2004). 69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Diagrama de flujo de energía (DQO) en la digestión anaerobia (basado en Gujer and Zehender, 1983) 17

Figura 3-2. Digestores anaerobios, a) Baja Tasa; b) Alta tasa 19

Figura 3-3. Digestor Anaerobio de flujo ascendente y lecho de lodos. 21

Figura 3-4. a) Geometría Americana; b) Geometría Clásica 24

Figura 3-5 a) Geometría europea; b). Geometría en forma de huevo 24

Figura 3-6. Aspecto de una espuma formada en un reactor anaerobio; espuma con coloración verdosa (Queiroz et al, 200x). 30

Figura 3-7. Aspecto de una espuma formada en un reactor anaerobio; espuma con coloración gris (Queiroz et al, 200x). 30

Figura 4-1. Vista en planta del digestor anaerobio de lodos ubicado en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua residual de Cerro de la Estrella. 32

Figura 4-2. Vista en corte transversal del digestor anaerobio de lodos ubicado en las instalaciones de Planta de Tratamiento de Agua Residual de Cerro de la Estrella. 33

Figura 4-3. Digestor anaerobio. Vista frontal. 33

Figura 4-4. Lona de PVC. Cubierta del digestor 33

Figura 4-5. Bomba de extracción de lodo. Registro de lodos primarios 34

Figura 4-6. Registro de lodos primarios. Línea de conducción de lodo primario. 34

Figura 4-7. Sistema de calentamiento. 35

Figura 4-8. Canaleta de recolección de sobrenadante y cárcamo de recirculación de sobrenadante. 35

Figura 4-9. Imagen donde se muestra el comienzo del retiro de la nata 38

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 4-10. Espejo de agua del digestor después de que se retiro la nata en la misma área de la figura anterior.....	38
Figura 4-11. Dispositivo utilizado para cuantificar el grosor de la nata.....	39
Figura 4-12. Cuantificación del grosor de la nata en el digestor UASB.....	39
Figura 4-13. Digestor UASB sin la cubierta aislante.....	40
Figura 4-14. Digestor UASB con la cubierta aislante (polifom).....	40
Figura 5-1. Sólidos suspendidos en lodo primario.....	42
Figura 5-2. Porcentaje de sólidos suspendidos volátiles en lodo primario.....	43
Figura 5-3. Sólidos suspendidos en lodo secundario.....	44
Figura 5-4. Fracción volátil de sólidos suspendidos en lodo secundario.....	45
Figura 5-5. Carga orgánica volumétrica alimentada al digestor.....	46
Figura 5-6. Relación de alcalinidades α y alcalinidad en lodo primario.....	47
Figura 5-7. Relación de alcalinidades α y alcalinidad en lodo secundario.....	47
Figura 5-8. pH en lodo primario y secundario.....	48
Figura 5-9. Sólidos suspendidos en sobrenadante.....	49
Figura 5-10. Porcentaje de sólidos suspendidos volátiles en sobrenadante.....	50
Figura 5-11. Relación alfa y alcalinidad en sobrenadante.....	51
Figura 5-12. Evolución del pH del sobrenadante.....	51
Figura 5-13. Sólidos suspendidos en cama de lodos del digestor.....	53
Figura 5-14. Fracción volátil en el lodo del digestor.....	54
Figura 5-15. Altura de cama de lodos en el digestor.....	55
Figura 5-16. Evolución de la temperatura del sobrenadante.....	56
Figura 5-17. Índice volumétrico de lodos y velocidad de sedimentación en el digestor.....	57
Figura 5-18. Apariencia de la nata sobre el espejo de agua del digestor UASB después de retirar la lona.....	58
Figura 5-19. Apariencia de la nata sobre el espejo de agua del digestor UASB después de retirar la lona.....	58
Figura 5-20. Apariencia de espejo de agua del digestor UASB antes de comenzar la alimentación diaria.....	58
Figura 5-21. Apariencia de espejo de agua del digestor UASB después de comenzar la alimentación. Se observa la formación de nata diferenciada sobre los puntos de alimentación.....	58
Figura 5-22. Evolución del grosor de la nata durante el periodo de observación sin alimentación y solo con recirculación. La nata era destruída cada 24 horas.....	59
Figura 5-23. Apariencia de la nata formada 8 horas después de que fue precipitada....	60
Figura 5-24. Apariencia de la nata formada 24 horas después de que fue precipitada..	60
Figura 5-25. Apariencia del espejo de agua con nula formación de nata después de haber colocado las hojas de polipropileno.....	61
Figura 5-26. Apariencia del espejo de agua con nula formación de nata después de haber colocado las hojas de polipropileno.....	61
Figura 5-27. Comienzo de la formación de nata sobre uno de los puntos de alimentación del digestor.....	62
Figura 5-28. Formación de nata 24 horas después de que se alimentó al digestor.....	62
Figura 5-29. Apariencia de la nata después de haberse agitado.....	63
Figura 5-30. Apariencia de la nata después de haberse agitado.....	63
Figura 5-31. Diagrama general de balance de masa.....	63
Figura 5-32. Diagrama de balance de masa de SSV en el digestor.....	64

1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace algunos años en México no existía normatividad que controlara la disposición de los lodos que se generaban en las plantas de tratamiento de aguas residuales, siendo estos residuos vertidos a tiraderos a cielo abierto, cuerpos de agua y otros lugares no adecuados para su disposición final. Los lodos de desecho que se producen durante las diferentes fases del tratamiento de las aguas residuales se constituyen de manera concentrada por diversos contaminantes y debido a su alto contenido de materia orgánica representan un potencial alto de putrefacción además de contener una elevada presencia de microorganismos patógenos y parásitos. Por otra parte, el elevado contenido de agua de estos lodos también provoca problemas como filtración de lixiviados a los mantos freáticos. Debido a esto, a partir del 15 de agosto del 2003 entró en vigor la NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece los elementos de regulación del manejo, reuso y disposición de residuos sólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Al entrar en vigor esta norma fue necesario disponer de dispositivos de tratamiento de lodos tanto para las nuevas plantas de tratamiento como para aquellas que están en funcionamiento. Preferentemente, estos dispositivos requerirán estar en concordancia con las condiciones económicas de nuestro país. En la actualidad se encuentran funcionando 1593 plantas de tratamiento de agua residual municipal en la República Mexicana (CONAGUA, 2006) de las cuales 372 son de lodos activados (CONAGUA, 2006), lo que se traduce en una generación significativa de lodos en estas plantas de aproximadamente 3,900 ton/día (CONAGUA, 2006). Estos números muestran el grave problema de disposición de residuos provenientes de las plantas de tratamiento y el costo que esto significa para la sociedad mexicana.

Estimaciones indican que el costo inicial en una planta de tratamiento de aguas residuales es del 60 % para el tratamiento de agua y del 40 % para el de los lodos generados en la planta (Metcalf & Eddy, 2003) sin incluir otros aspectos como la operación y el transporte, mismos que elevan considerablemente el costo del metro cúbico de tratamiento del agua.

1 INTRODUCCIÓN

El tratamiento anaerobio de lodos se presenta como una opción viable por su bajo costo de operación. Este tratamiento permite la depuración de residuales orgánicos biodegradables cuando la concentración de materia orgánica es tan elevada que no resulta económico utilizar un tratamiento aerobio. El tratamiento anaerobio logra la reducción de materia orgánica con necesidades de insumos, operación y mantenimiento relativamente bajos.

En los países desarrollados se cuenta con un amplia experiencia en el tratamiento anaerobio de lodos que ha sido producto de años de investigación y experimentación dando como resultado que actualmente dispongan de una gran variedad de opciones de tratamiento, permitiendo que estos residuos ya tratados (biosólidos) puedan ser aplicados como mejoradores de suelo. Es el caso de los Estados Unidos, donde más del 60 % de los lodos son aprovechados (EPA, 1999) mientras que en Europa ésta práctica es la más utilizada para la reutilización de lodos, siendo aproximadamente el 45 % del volumen total. En México se cuenta con poca experiencia e investigación que proporcionen los conocimientos que permitan adecuar esta tecnología a las necesidades y realidades económicas de nuestro país y que proporcionen resultados aceptables. Por lo anterior, es necesaria la búsqueda de nuevas tecnologías sustentables en países en desarrollo como el nuestro. Esto quiere decir que el lodo producto del uso de esas tecnologías pueda ser reutilizado o depositado en los sitios adecuados sin que ponga en peligro el medio ambiente y principalmente la salud pública, además de que puedan ser competitivas en el mercado.

Con base en lo anterior, este estudio pretende avanzar en la evaluación de la factibilidad técnica y económica de un digestor no convencional diseñado bajo el concepto UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) para llevar a cabo la digestión de lodos de purga de una planta de tratamiento de aguas residuales, cuyo propósito es generar biosólidos con la calidad que cumpla las normas mexicanas sobre la materia y puedan ser utilizados como mejoradores de suelos.

2 OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Evaluar la capacidad del digestor anaerobio no convencional tipo UASB para digerir lodos de purga de una planta de tratamiento de aguas residuales para cumplir con la Norma NOM-004-SEMARNAR-2002 y sean utilizados como biosólidos

2.2 Objetivos Particulares

- Caracterizar la operación del digestor tipo UASB bajo condiciones mesofílicas a 35 °C y carga másica de 2.5 kg SSV/m³día.
- Identificar y realizar mejoras en el proceso con objeto de reducir la formación de natas.

3. ANTECEDENTES

3.1 Lodos de desecho y su tratamiento

Durante el tratamiento de las aguas residuales se produce una corriente de residuos llamada lodos de purga que presentan diferentes características según el tipo de tratamiento empleado sobre el agua residual y se clasifican como lodos primarios, lodos biológicos y lodos generados en procesos fisicoquímicos.

3.1.1 *Lodos primarios y biológicos*

a- Lodos primarios proceden de la purga de los sedimentadores primarios de los sistemas de tratamiento de agua residual municipal. Se componen de partículas de fácil sedimentación, el 70% de su composición es de naturaleza orgánica (Cesar y Vázquez, 2001). Este lodo adopta condiciones anaerobias rápidamente y es fácilmente putrescible.

b- Lodos secundarios, procedentes de la sedimentación secundaria. Estos lodos se componen principalmente de biomasa. El 80 % de los sólidos de estos lodos son de naturaleza orgánica (Cesar y Vázquez, 2001) además que el contenido de sólidos depende del punto del proceso de donde se extraigan. Particularmente, los lodos que provienen de un sistema de lodos activados tienen una apariencia floculenta de color marrón. Cuando estos lodos toman una apariencia de color oscuro es señal de que están a punto de entrar en condiciones sépticas por la falta de aeración y por otra parte una tonalidad muy clara acompañada de una lenta sedimentación es debida a un proceso sobrecargado en materia orgánica y probable deficiencia de nitrógeno o fósforo. La Tabla 3-1 presenta la composición fisicoquímica típica de los lodos primarios y secundarios sin que hayan recibido algún tratamiento previo (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 3-1. Intervalo de valores de la composición fisicoquímica típica de los lodos primario y secundario. (Metcalf and Eddy, 2003)

Características	Lodo primario		Lodo secundario	
	% sólidos totales (peso seco)	5	9	0.8
%sólidos totales volátiles	60	80	59	88
% grasas y aceites				
solubles en éter	6	30		
extracto en éter	7	35	5	12
Proteínas (% de sólidos totales)	20	30	32	41
Nitrógeno (% de sólidos totales)	1.5	4	2.4	5
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de sólidos totales)	0.8	2.8	2.8	11
Potasio (K ₂ O, % de sólidos totales)	0	1	0.5	0.7
Celulosa (% de sólidos totales)	8	15		
Hierro (no como sulfuro)	2	4		
Sílice (SiO ₂ , % de sólidos totales)	15	20		
pH	5	8	6.5	8
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	500	1500	580	1100
Ácidos Orgánicos (mg/L como HAc)	200	2000	1100	1700
Contenido Energético, kJ/kg SST	23,000	29,000	19,000	23,000

3.1.2 Lodos fisicoquímicos

- a) Lodos de precipitación de las plantas de ablandamiento y tratamiento de desechos industriales.
- b) Lodos de hidróxido generados a partir de la coagulación y sedimentación de las aguas residuales y desechos industriales.

3.2 Operaciones y procesos de tratamiento de lodos de desecho

Al tratar los lodos de desecho provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales se busca reducir la cantidad de patógenos, el contenido de material volátil, la cantidad de agua, eliminar olores y reducir el potencial de putrefacción de la materia orgánica, con el propósito de cumplir con los límites permisibles para que la disposición de estos desechos sea menos peligrosa para la salud pública y menos dañina para el medio ambiente.

3 ANTECEDENTES

Existen varios procesos para llevar a cabo el tratamiento de lodos y están en función de la procedencia de los mismos. Entre ellos el más común se integra por el espesamiento, la estabilización, la deshidratación y la disposición final.

3.2.1 Espesamiento

Esta operación se realiza con la finalidad de reducir el volumen de lodos a manipular, facilitar la transportación y almacenamiento del lodo, dando como resultado un menor requerimiento de volumen de las instalaciones de estabilización, menor consumo de energía utilizada para el calentamiento para la digestión de los lodos y menor consumo de reactivos químicos necesarios en el proceso de tratamiento. El fenómeno físico buscado con esta operación es el aumento de la concentración de sólidos a través de eliminar agua y minimizar la fracción líquida del lodo.

Existen varios métodos para el espesamiento del lodo. Los más comunes son el espesamiento por gravedad, el espesamiento por centrifugación y el espesamiento por flotación, como se describen a continuación:

El espesamiento por gravedad. Depende directamente del tamaño, forma y densidad de las partículas, y la densidad y viscosidad del líquido en el que están inmersas. Se aprovecha la fuerza de gravedad que de manera natural le imprime a las partículas un movimiento descendente haciendo que se depositen en el fondo de un tanque. Este tanque de espesamiento presenta tres zonas claramente definidas, siendo la primera aquella que muestra la superficie del líquido clarificado, en donde se tiene un líquido relativamente claro, en seguida se tiene una zona de sedimentación y por último una zona de compactación en donde ocurre el fenómeno de aglomeración de las partículas. Es importante mantener una cama de lodos permanente para lograr una buena operación, por lo que es necesario calcular el volumen de lodos retenido y el volumen de lodos removidos del espesador por día, para lo que se requiere definir la relación de volumen de lodos (RVL) que es el cociente entre la cama de lodo que permanece en el espesador y el volumen de lodo espesado removido por día, cuyo valor oscila entre 0.5 – 2 días (Qasim, 1994). Es importante tener cuidado con el tiempo de permanencia de los lodos en el espesador ya que tiempos de retención demasiado largos pueden provocar la gasificación y flotación de los lodos. El grado de espesamiento depende directamente de la naturaleza del lodo y este va de 2 a 5 veces la concentración del

3 ANTECEDENTES

sólido inicial; la concentración máxima que puede alcanzar un lodo en un espesador de gravedad es del 10% (Qasim, 1994).

Espesamiento por flotación. Las concentraciones máximas que se pueden alcanzar en este tipo de espesador son de entre el 5 y el 8%, dependiendo de la procedencia de los lodos. Este tipo de espesador funciona a partir de la saturación de aire en una corriente de recirculación que se mezcla con el influente. Esta corriente de aire saturado al ser sometido a la presión atmosférica libera pequeñas burbujas de aire que en su ascenso arrastra las partículas en suspensión que se adhieren a ellas haciendo que estas lleguen y permanezcan en la superficie. Precisamente esta característica en su funcionamiento hace que este tipo de espesadores sea de gran ayuda en influentes con partículas de baja sedimentabilidad como son los provenientes de sistemas de lodos activados.

Espesamiento por centrifugación (Decanter). Las concentraciones máximas que se pueden alcanzar en un espesador de este tipo van del 5% al 8% (Qasim, 1984). Este espesado consiste en someter a una fuerza centrífuga al lodo provocando una separación de la porción sólida de la líquida. Hay que hacer mención que este equipo es diferente a la centrífuga para deshidratación de lodos, que puede alcanzar hasta el 25% en sólidos. Es importante tomar en cuenta, para que el lodo no se vea afectado en sus propiedades reológicas, que éste no alcance un espesamiento mayor al del 7 % cuando vaya a someterse a digestión anaerobia (Noyola, 1998).

3.2.2 Estabilización

Los objetivos principales de la estabilización de los lodos son reducir la concentración de patógenos, eliminar olores desagradables, reducir o eliminar su potencial de putrefacción reduciendo el contenido de materia volátil o las condiciones de degradación.

Los procesos más comunes para la estabilización del lodo son:

- Digestión aerobia
- Digestión anaerobia
- Estabilización con cal
- Composteo

3 ANTECEDENTES

Digestión aerobia: este método de estabilización consiste en llevar a la biomasa del sistema hasta la fase endógena mediante la aireación del lodo (presencia de oxígeno), es decir que, en la degradación de los lodos biológicos ante la falta de sustrato exógeno los microorganismos consumen las reservas de su propio protoplasma para obtener la energía necesaria para llevar a cabo sus funciones. Esto lleva a la lisis de la célula y por ende a la reducción de la materia en suspensión volátil. La Tabla 3-2 presenta las ventajas y desventajas de la digestión aerobia en comparación con la digestión anaerobia.

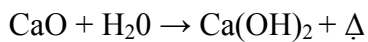
Digestión anaerobia. Es un proceso de degradación que convierte a la materia orgánica en metano y dióxido de carbono en ausencia de oxígeno. Este proceso será tratado con mayor detalle más adelante.

Tabla 3-2. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia y aerobia de lodos (Perez, 2004)

Digestión aerobia		Digestión anaerobia	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Costos de inversión menores, así como menor complejidad en su operación	Elevados costos de operación asociados al consumo de energía para el abastecimiento de oxígeno	El biogás producido es combustible convirtiendo a la digestión anaerobia como un proceso productor de energía misma que se puede utilizar en el calentamiento de los digestores de alta tasa o en la producción de energía eléctrica utilizable en la planta de tratamiento.	Los costos de inversión inicial son altos
Produce un sobrenadante con menor concentración de materia orgánica.	Los lodos producidos son difíciles de deshidratar por medios mecánicos.	Fácil deshidratación del lodo en lechos de secado, filtros prensa, banda o centrifugas	Las características del sobrenadante son inadecuadas significando una sobrecarga al proceso de tratamiento del agua residual ya que tiene que retornarse al inicio del sistema.
No produce malos olores y genera un producto final biológicamente estable y de gran potencial en el uso de mejorador de suelos.		Por sus características fisicoquímicas y su estabilidad el lodo digerido puede aprovecharse como mejoradores de suelos.	En nuestro país limitada experiencia en el diseño, construcción y operación de digestores anaerobios de lodos de purga.

3 ANTECEDENTES

Estabilización con cal. En este proceso se lleva a cabo una reacción química que provoca la estabilización del lodo por el efecto de la combinación de la temperatura y el pH lo que hace que sea además un método efectivo para la eliminación de patógenos. El pH a alcanzar es de 12 ó más durante el tiempo de contacto necesario (aproximadamente dos horas) teniendo que adicionar para cumplir este objetivo la cantidad suficiente de cal. Al adicionar cal al lodo ésta reacciona con el agua de la siguiente manera:



Produciéndose el enlace químico del agua con el calcio y el efecto combinado del aumento de temperatura y pH.

El lodo estabilizado con este método presenta condiciones favorables para su disposición en rellenos sanitarios, en suelos forestales e inclusive en suelos ácidos de uso agrícola. La principal desventaja que tiene la estabilización con cal es que se aumenta considerablemente la masa y el volumen de lodo tratado, repercutiendo directamente en los costos de transportación y de adquisición de área de disposición, además de que el alto pH del lodo estabilizado limita las opciones de disposición. Otra desventaja es que bajo ciertas condiciones el lodo tiende a desestabilizarse.

Estabilización por composteo. Es un proceso de descomposición aerobia en el que los lodos en estado sólido o semisólido, mezclados con un residuo sólido de naturaleza celulósica, se oxidan al añadir aire por movimiento del material o por medio de inyección. Con esta acción se genera una reacción exotérmica que al liberar energía y provocar un aumento de temperatura destruye a los organismos patógenos. El producto de la estabilización por este método es un lodo muy útil como mejorador de suelo, aunque sus principales desventajas son un alto requerimiento de área, el control de la humedad del lodo, la aireación y que la cantidad de composta a disponer es significativamente mayor que la del lodo por tratado.

3 ANTECEDENTES

En la Tabla 3-3 se muestran parámetros útiles para la evaluación de la eficiencia de diferentes métodos de estabilización de lodos.

Tabla 3-3. Comparación de los diferentes métodos de estabilización de lodos (Qasim, 1994)

Método	Reducción de olor	Eficiencia en la destrucción de patógenos	Remoción de tóxicos	Facilidad para deshidratar	Reúso del lodo
Digestión anaerobia mesófila	+	+	+	+	+
Digestión anaerobia termófila	0	++	+	+	++
Digestión aerobia mesófila	+	+	0	-	+
Digestión aerobia termófila	+	++	0	-	++
Tratamiento con Ca(OH) ₂	+	+	++	+	+
Tratamiento con CaO	+	++	0	+	+
Composteo	+	++	0	NA	++
Lagunas	0	+	0	+	NA
Cloración	+	++	-	+	-
Irradiación	0	++	0	+	+
Pasteurización	-	++	0	+	+
Secado	++	++	0	NA	+
Incineración	++	++	0	NA	+

- efecto negativo, 0 no eficiente, + eficiente, ++ muy eficiente, NA no aplicable.

Se puede observar en la

Tabla 3-3 que la digestión anaerobia mesófila y termófila tienen una adecuada calidad comparándolas con el resto de los métodos presentados. La limitante más importante de este proceso es su alto costo inicial

3.2.3 Deshidratación

Esta operación unitaria tiene la finalidad de reducir el contenido de humedad de los lodos. Con esta acción se logra disminuir el costo de manejo de lodos al reducir parte de su volumen y masa antes de esta operación. La reducción de costos se refleja directamente en el costo de transporte de lodo del sitio donde fue tratado hasta el lugar de su disposición final. Otro beneficio es la reducción de malos olores (el exceso de

3 ANTECEDENTES

humedad favorece la aparición de estos). También se minimiza la formación de lixiviados.

Para elegir el método de deshidratación de lodos más adecuado se debe de tomar en cuenta que tipo de lodos son los que van a ser deshidratados, el uso posterior a la deshidratación así como el lugar donde se van a confinar. Los principales procesos que existen para la deshidratación son los lechos de secado, los filtros de vacío, centrífugas, filtros banda y filtros prensa.

Lechos de secado: Este método es muy utilizado en las plantas de tratamiento de tamaño pequeño y mediano y es un método muy antiguo. Los lechos de secado generalmente están constituidos por una capa de arena de 15 a 20 cm de espesor, que a su vez es soportada por una cama de grava dispuesta en un cajón abierto de concreto. La disposición del lodo es en capas de 20 a 30 cm sobre la arena. El lodo se deja secar por periodos de 10 a 15 días. Con esto se obtiene un porcentaje de sólidos del 30 al 40 % (Qasim, 1994). Si se tienen lodos no digeridos este método no será el más recomendable para utilizar ya que se pueden generar olores desagradables. El bajo costo de inversión inicial así como el de operación son las principales ventajas de este método así como la concentración de lodos que se obtiene. Su desventaja es el área requerida y que su eficiencia depende de las condiciones meteorológicas del lugar.

Filtros de vacío: consiste en una banda hecha de lona de fibra sintética que cubre el parcialmente a un cilindro y que es hecha pasar por el lodo de manera lenta para después viajar sobre el cilindro al que se le provoca un vacío que hace que el agua contenida en el lodo adherido pase a través de banda provocando la deshidratación y alcanzando concentraciones de sólidos que van del 18% al 45% (Metcalf and Eddy, 1991)

Centrífugas: consiste en someter al lodo a fuerzas centrífugas empleando velocidades de 1600 a 2000 rpm. Se obtiene un porcentaje de sólidos de entre el 20 y 35%, con una captura de sólidos del 85 al 90% (Qasim, 1994). Entre las ventajas que este tipo de sistemas ofrece, se tiene que ocupan muy poco espacio y generalmente son totalmente cerrados, lo que reduce la emisión de olores. Por otro lado, este tipo de sistemas tiene desventajas como la complejidad de su mantenimiento, problemas de abrasión, y el

3 ANTECEDENTES

líquido producto de la deshidratación tiene aún una alta concentración de sólidos suspendidos.

Filtros banda: la alimentación y deshidratación se lleva a cabo a través de dos bandas móviles que pasan entre juegos de rodillos, produciéndose una concentración de sólidos final del orden del 25%. El funcionamiento de este proceso consiste en adicionar químicos que preparan al lodo para después ser drenado por gravedad, además de aplicarle presión mecánica para extraer lo mas posible la humedad. Una ventaja de este sistema es su bajo requerimiento de energía que, junto con la concentración de sólidos del producto final que se alcanza, son las ventajas mas notorias de este proceso (Metcalf and Eddy, 1991). Por otra parte, las principales desventajas de este proceso son la corta vida útil de la banda y su sensibilidad a la operación con distintos tipos de lodos.

Filtro prensa: estos filtros funcionan con base en una serie de platos circulares o rectangulares ahuecados en ambas caras, que sirven de soporte de membranas flexibles, de tal manera que cuando son presionados unos contra otros, con el lodo en el hueco y entre las membranas, la humedad pasa a través de ellas. Cada plato cuenta con una superficie que está cubierta con una membrana filtrante que al aplicársele presiones de entre 350 y 1575 kN/m², el agua pasa a través de la membrana mientras que los sólidos quedan atrapados en el hueco formado por los platos. Las “tortas” de lodo productos de este proceso tienen un espesor que varía entre los 25 y 38 mm, con una concentración de sólidos del 20 al 40%. Esta concentración se alcanza trabajando con ciclos de filtrado que van de 2 a 5 horas (Metcalf and Eddy, 1991). La principal ventaja es la alta concentración de sólidos en los lodos deshidratados alcanzados con este método. Y sus principales desventajas son la complejidad mecánica de la maquinaria utilizada, los altos costos de los acondicionadores químicos utilizados, su operación discontinua y la corta vida útil del medio filtrante utilizado.

3.3. Disposición final

Si se decide depositar el lodo en un relleno sanitario se deben de tomar en cuenta algunas consideraciones como que el relleno esté debidamente controlado y operado,

3 ANTECEDENTES

además que esté ubicado en un área alejada de lagos, estanques, ríos, pozos para suministro de agua, carreteras, aeropuertos y zonas habitadas. Por último se deben de compactar y cubrir con tierra. Algo muy importante a tomar en cuenta es que el lodo este bien deshidratado para evitar la formación de lixiviados.

Si se decide utilizar al lodo como mejorador de suelos agrícolas es necesario que la estabilización de los lodos se lleve a cabo cumpliendo la normatividad al respectiva. Esta alternativa está tomando mayor importancia por el alto contenido de nutrientes que aunque no se encuentran en las proporciones que podrían tener los fertilizantes fabricados, la experiencia ha demostrado los beneficios de esta alternativa. Los nutrientes que se encuentran en el lodo son el nitrógeno y el fósforo, además de contener otros micronutrientes como el manganeso, cobre, zinc, molibdeno y hierro.

Las especificaciones y límites máximos permisibles de los contaminantes contenidos en los lodos producto de un tratamiento de agua residual, llamados biosólidos y que podrían ser utilizados para su aprovechamiento son regulados de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002) que se publicó en agosto del 2003 en el Diario Oficial de la Federación. En ésta se establece que se tendrá que reducir el contenido de sólidos suspendidos volátiles del lodo en un 38 % como mínimo, con el propósito de controlar la atracción de vectores. La Norma indica solo de forma enunciativa diferentes maneras para cumplir con esta disposición pero sin ser limitativo. En lo que se refiere al contenido de metales pesados que pudiera tener un lodo, la Tabla 3-4 presenta los límites máximos permisibles de la NOM-004 y una clasificación en dos tipos de los lodos: “excelente” y “bueno” que están en función del contenido de estas sustancias.

Tabla 3-4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002)

Contaminante (determinados en forma total)	Exelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000

Tabla 3-4. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002). Continuación.

Contaminante (determinados en forma total)	Exelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

En cuanto al contenido de patógenos en el lodo que se pretenda reutilizar los límites máximos permisibles establecidos en la norma se muestran en la Tabla 3-5 y se hace una clasificación del lodo de acuerdo a la cantidad de coliformes fecales (NMP/g), *Salmonella* y huevos de helmintos.

Tabla 3-5. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM-SEMARNAT-2002).

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella</i> spp. NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables

3 ANTECEDENTES

La NOM-004-SEMARNAT-2002 establece el aprovechamiento de los lodos en función del tipo y clase, mostrados en la Tabla 3-4 y la Tabla 3-5. El contenido de humedad en los lodos no debe rebasar el 85%. La Tabla 3-6 muestra los parámetros que regulan el aprovechamiento de los lodos según dicha ley.

Tabla 3-6. Aprovechamiento de biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none">• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.• Los establecidos para la clase B y C
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none">• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación• Los establecidos para la clase C
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none">• Usos forestales• Mejoramiento de suelos• Usos agrícolas

3.4 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia se lleva a cabo en ambientes que tienen como característica la ausencia total de oxígeno. Es una serie de reacciones bioquímicas complejas, a través de las cuales diferentes grupos de microorganismos se encuentran relacionados por su sustrato y sus productos específicos. Dichos microorganismos degradan la materia orgánica, generando como productos finales materia celular, metano y dióxido de carbono.

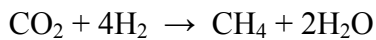
3.4.1 Aspectos bioquímicos y microbiológicos

La digestión anaerobia inicia con la hidrólisis de compuestos de alto peso molecular, generalmente proteínas, carbohidratos y lípidos a compuestos simples y asimilables por bacterias por medio de enzimas extracelulares. Los productos de la hidrólisis de estos compuestos son aminoácidos, azúcares y ácidos grasos que sirven de sustrato a organismos fermentadores y bacterias anaerobias oxidadoras que los convierten en

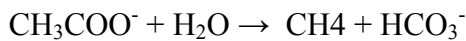
3 ANTECEDENTES

acetato, hidrógeno y productos intermedios como el butirato y propionato. Los productos intermedios son degradados hasta acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias llamadas bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno (BAPH). El acetato e hidrógeno producidos son los principales sustratos de las bacterias metanogénicas, las cuales se dividen en dos grupos tróficos:

Las bacterias metanogénicas hidrogenofílicas utilizan el hidrógeno producido por las BAPH para reducir el CO_2 a CH_4 :



Las bacterias metanogénicas acetoclásticas transforman el acetato en CH_4 . Estas bacterias contribuyen con el 70% del metano producido en los digestores:



En la digestión anaerobia se pueden mencionar seis procesos de conversión que se llevan a cabo:

1. Hidrólisis de biopolímeros
2. Fermentación de aminoácidos y azúcares
3. β -oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes
4. Oxidación anaerobia de productos intermedios, como ácidos volátiles y alcoholes (excepto acetato)
5. Conversión del acetato a metano; metanogénesis acetoclástica.
6. Producción de metano a partir de H^+ y CO_2 ; metanogénesis reductora.

En la Figura 3-1 se muestra el flujo de energía (DQO) en la digestión anaerobia.

Cuando se incrementa la presión parcial de H_2 el desarrollo del grupo bacteriano BAPH se puede inhibir, lo que repercute en una acumulación de ácidos grasos volátiles provocando la acidificación del reactor. Cabe mencionar que una buena parte de la producción de H_2 en el proceso anaerobio se debe al metabolismo de estas bacterias, lo que da lugar a la existencia de una relación sintrófica de estos microorganismos con el

3 ANTECEDENTES

grupo de bacterias llamadas hidrogenofilicas, que como su nombre lo indica son consumidoras de hidrógeno: Esta relación mantiene los niveles de concentración de este gas a niveles adecuados para que la producción de acetato e hidrógeno pueda llevarse a cabo de manera adecuada (Noyola, 1998).

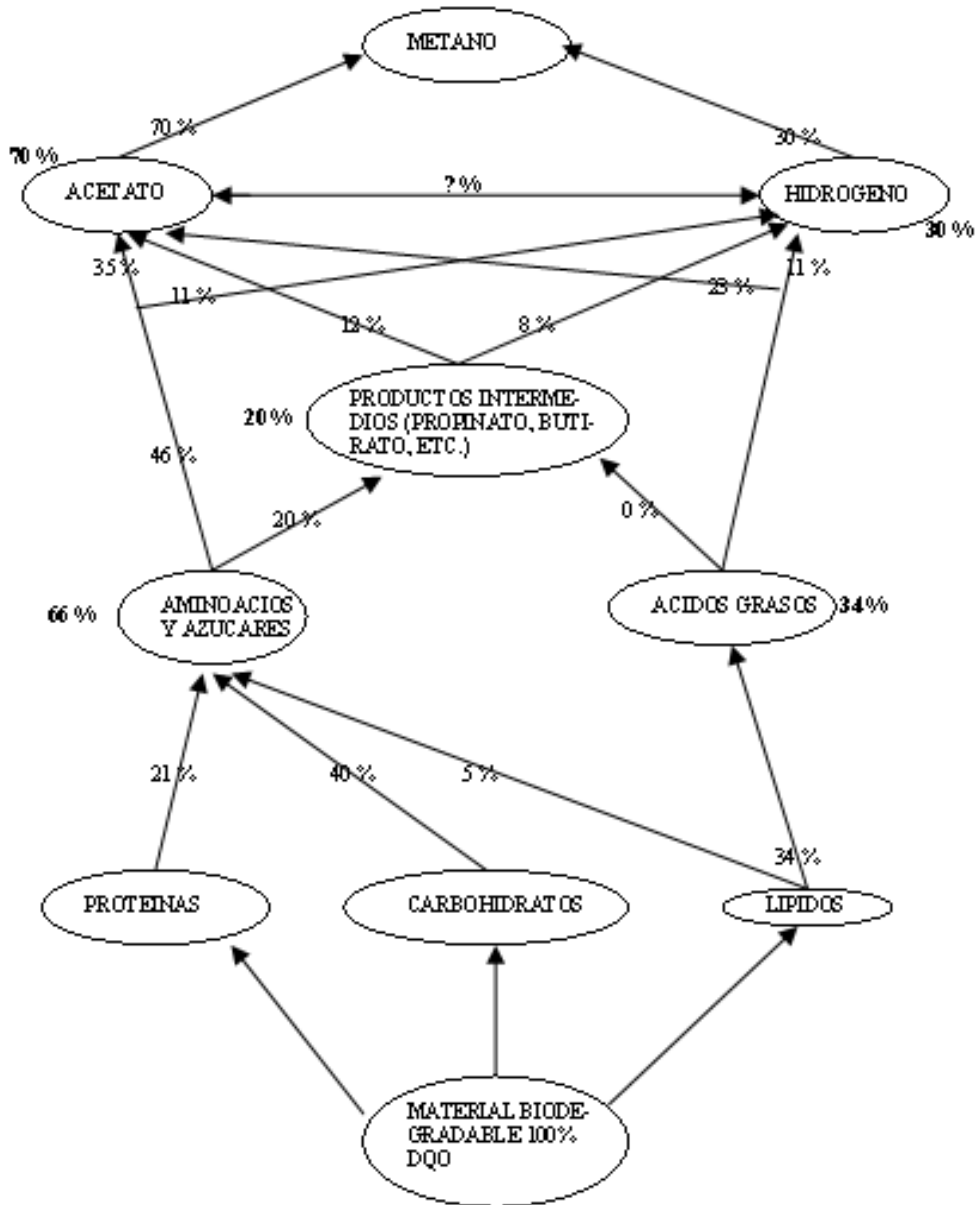


Figura 3-1. Diagrama de flujo de energía (DQO) en la digestión anaerobia (basado en Gujer and Zehender, 1983)

3.4.2 Factores Ambientales

Existen factores ambientales que se relacionan con los parámetros de control del proceso de un sistema anaerobio y que sus variaciones tienen una repercusión directa con el buen funcionamiento del sistema, afectando por ejemplo a la biomasa anaerobia. Por lo tanto, el conocimiento de estos factores ambientales tanto como de los parámetros de control es de vital importancia, ya que permitirá evitar fallas de operación o tomar las medidas correctivas, que se verán reflejadas en una adecuada remoción de materia orgánica y en la producción de biogás.

Los factores ambientales más importantes que influyen directamente sobre el funcionamiento de un sistema anaerobio se describen a continuación:

Temperatura: la variación de la temperatura influye en gran medida en el funcionamiento de los sistemas anaerobios ya que los microorganismos que intervienen en la digestión anaerobia son sensibles a los cambios de temperatura del medio en que se desarrollan. En la práctica se aplican dos intervalos de temperatura. Uno es el mesofílico, en el que la temperatura óptima para los microorganismos es de 37 °C (Noyola, 1998), y el otro es el termofílico, donde la temperatura óptima es de 55 °C (Malina and Pohland, 1992).

pH: La digestión anaerobia puede llevarse a cabo dentro de un intervalo de pH comprendido entre 6.2 y 7.8, siendo el óptimo entre 7.0 y 7.2. Fuera del rango señalado como óptimo, el proceso puede funcionar, aunque con menores eficiencias. A un pH de 6.2 las bacterias metanogénicas se empiezan a ver afectadas severamente (Noyola, 1998) y a niveles de pH alcalinos, se afecta principalmente a las bacterias metanogénicas acetoclásticas (Malina and Pohland, 1992).

Alcalinidad: Debido que las bacterias acidogénicas poseen una mayor actividad que las bacterias metanogénicas, ante sobrecargas orgánicas son capaces de provocar la acidificación del reactor, lo que puede evitarse manteniendo en el digestor una óptima

3 ANTECEDENTES

capacidad amortiguadora (buffer). La alcalinidad útil para fines de amortiguamiento, en valores de pH típicos de operación, es la debida al ión bicarbonato, en tanto que la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles, una forma indirecta de medir su concentración, debe mantenerse en el nivel más bajo posible. Un criterio para verificar si la carga orgánica suministrada al digestor es la adecuada para el proceso anaerobio es la relación α que es el cociente entre la alcalinidad debida a los bicarbonatos y la alcalinidad total. La primera se obtiene mediante un proceso de titulación de una muestra de volumen conocido, midiendo el consumo de ácido (H_2SO_4 0.2 N) hasta un pH de 5.75; y la segunda es la cantidad de ácido utilizado hasta un valor de pH de 4.3 (Jenkins *et al.*, 1991),

$$\alpha = \text{Alc}(\text{HCO}_3^-)_{5.75} / \text{Alc}(\text{total})_{4.3}$$

En reactores anaerobios que tratan aguas residuales el valor de α durante el arranque deberá mantenerse arriba de 0.5, un valor superior a 0.7 muestra una operación estable, pudiendo incrementarse la carga del reactor (Noyola, 1994). Para los digestores de lodos, los valores de alfa son inferiores, de tal forma que un digestor bien operado tendrá valores del orden de 0.5 y de 0.3 como límite inferior.

3.5 Digestores anaerobios de lodos

Podemos agrupar las tecnologías que actualmente se utilizan para la digestión de lodos por vía anaerobia, exceptuando las aplicadas para el tratamiento de efluentes líquidos, en dos tipos. En la Figura 3-2 a y b se muestran los digestores de baja tasa o de primera generación y los digestores de alta tasa o de segunda y tercera generación.

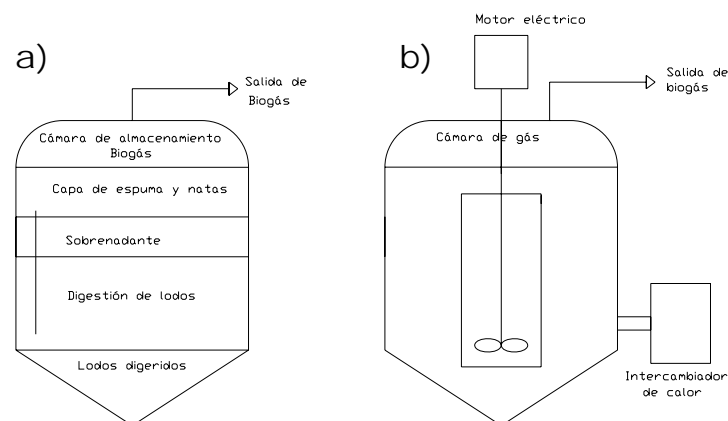


Figura 3-2. Digestores anaerobios, a) Baja Tasa; b) Alta tasa

3 ANTECEDENTES

Los digestores de baja tasa conocidos también como convencionales, son aquellos en los cuales el proceso se lleva a cabo sin calentamiento ni mezclado, por lo que se favorece la estratificación del fluido, propiciando que la actividad biológica se lleve a cabo en el 50% del volumen del reactor. Este tipo de digestor se utiliza principalmente en plantas pequeñas. En vista de mejorar el desempeño de este tipo de digestores se introduce un mecanismo de mezclado que permite que sean alimentados con una mayor carga de lodos, ya que de esta forma se favorece la transferencia de masa y se emplea todo el volumen del líquido en la digestión.

En los digestores de alta tasa, además del mezclado al medio de la reacción, ya sea mediante agitación mecánica, por la recirculación de gas o líquido o por una combinación de ambos, se cuenta con un sistema de calentamiento que elevará la temperatura del digestor a los rangos mesófilos o termófilos. Para ello se utiliza el propio biogás producido por el sistema.

El digestor anaerobio de alta tasa convencional (Figura 3-2 b) es adecuado para altas concentraciones de material particulado biodegradable. La mezcla disminuye los problemas de taponamiento, aunque el material particulado no biodegradable y denso (típicamente arenas y precipitados) se puede sedimentar y acumular, produciendo volúmenes muertos y cortos circuitos. Además, se homogeniza la temperatura y el pH dentro del tanque. El mezclado se puede realizar con un agitador mecánico o preferentemente por recirculación de gas comprimido, en forma continua o intermitente.

Por otro lado, en materia de tratamiento de aguas residuales industriales o municipales, el reactor anaerobio de flujo ascendente y lecho de lodos (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) mostrado en la Figura 3-3, se ha empleado con éxito y actualmente es el reactor anaerobio para efluentes líquidos con más aplicaciones en el mundo. En este sistema, el influente es introducido de manera ascendente por la parte baja del reactor, atravesando un lecho de lodos (biomasa) de alta sedimentabilidad. El tratamiento se lleva a cabo cuando el influente del reactor entra en contacto con el lecho de lodos (lodo granular o floculento). El biogás producido genera una expansión en la cama de lodos que contribuye a la mezcla constante de la biomasa. El gas liberado es capturado por

3 ANTECEDENTES

dispositivos llamados colectores y el efluente es evacuado por la parte superior del reactor, ya clarificado.

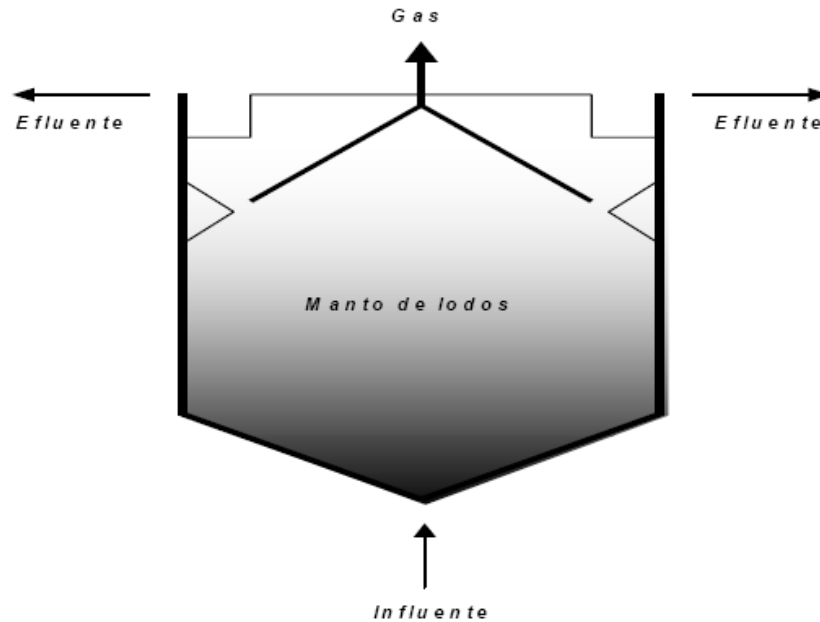


Figura 3-3. Digestor Anaerobio de flujo ascendente y lecho de lodos (Barrios, 2007).

3.5.1 Diseño de digestores anaerobios

Los métodos mas utilizados para el diseño de un digestor de lodos son predominantemente empíricos, empleando como parámetro de diseño el tiempo de retención celular o la carga orgánica. Los digestores de lodos de alta tasa convencionales generalmente son reactores completamente mezclados sin ningún tipo de recirculación, salvo la necesaria para la transferencia de calor, a través de un intercambiador, por lo que el tiempo de retención hidráulica (Θ_H) y el tiempo de retención celular (Θ_C) son iguales, pudiendo calcular el volumen de un digestor de la siguiente manera:

$$V = Q * \Theta_C$$

En donde:

3 ANTECEDENTES

- V: Volumen del reactor (m³)
 Q: Gasto (m³/d)
 Θ_C : Tiempo de retención celular (días)

Los valores recomendados para el Θ_C se muestran en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Tiempos de retención celular para el diseño de digestores de lodos completamente mezclados. Lodos al 4% como mínimo (Metcalf & Eddy, 2003).

Temperatura	Θ_C de diseño (días)
18	28
24	20
30	14
35	10
40	10

Para el diseño con base en la carga orgánica volumétrica, se utilizan valores para digestores de baja tasa del orden de 0.5 a 1.0 kgSSV/m³d, en caso de no haber mezcla inducida, y en caso de haberla de 1.0 a 1.6 kgSSV/m³d. Para digestores de alta tasa este valor será de 1.6 a 3.2 kgSSV/m³d. La Tabla 3-8 muestra la relación entre la concentración de sólidos en el influente y la carga orgánica a diferentes tiempos de retención.

Tabla 3-8. Efecto de la concentración de sólidos y el tiempo de retención sobre la carga orgánica en digestores anaerobios (Metcalf and Eddy, 2003)

%SST en el lodo	Carga orgánica (kg SSV/m ³ día)			
	TRH: 10 d (37° C)	TRH: 12 d (35° C)	TRH: 15 d (30° C)	TRH: 20 d (25° C)
4	3.06	2.55	2.04	1.53
5	3.83	3.19	2.55	1.91
6	4.59	3.83	3.06	2.3
7	5.36	4.46	3.57	2.68
8	6.12	5.1	4.08	3.06
9	6.89	5.74	4.59	3.44
10	7.65	6.38	5.1	3.83

Límite recomendado para evitar los problemas de en el mezclado y operación de los equipos de bombeo: SSV= 7% SST

3 ANTECEDENTES

En la Tabla 3-9 se resumen las condiciones ambientales y de operación para obtener la máxima producción de metano durante la digestión anaerobia de lodos de purga.

Tabla 3-9. Condiciones ambientales y de operación durante la digestión anaerobia de lodos de purga (Malina y Pohland, 1992).

Variable	Óptimo	Intervalo
pH	6.8-7.4	6.4-7.8
Potencial oxido-reducción (mV)	-520 a -530	-490 a -550
Ácidos volátiles (mg/L ácido acético)	50-500	<2000
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	1500-3000	1000-5000
Temperatura		
Mesofila (C)	32-38	20-40
Termofila (C)	50-56	45-60
Tiempo de retención hidráulica (d)	10-15	7-30
Producción de gas (m³CH₄/kgSSV_{eliminados})	0.75-1.12	
Composición del gas:		
Metano (% CH₄)	65-70	60-75
Dióxido de carbono (% CO₂)	30-35	25-40

3.5.2 Geometría de digestores anaerobios convencionales de lodos

La geometría en un digestor de lodos influye en factores como el mezclado de lodos, en la generación de zonas muertas y en la acumulación de sólidos en las esquinas del digestor.

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

La geometría americana, mostrada en la Figura 3-4 a), en la parte superior puede tener una cubierta flotante para la captación del biogás y el fondo del digestor tiene una

3 ANTECEDENTES

pendiente casi imperceptible. Se ha observado que esta geometría presenta inconvenientes con respecto al mezclado de los lodos, atribuidos principalmente a que su relación diámetro-altura es mayor a uno, lo que provoca la presencia de zonas muertas, la acumulación de sólidos en el fondo y la generación de natas.

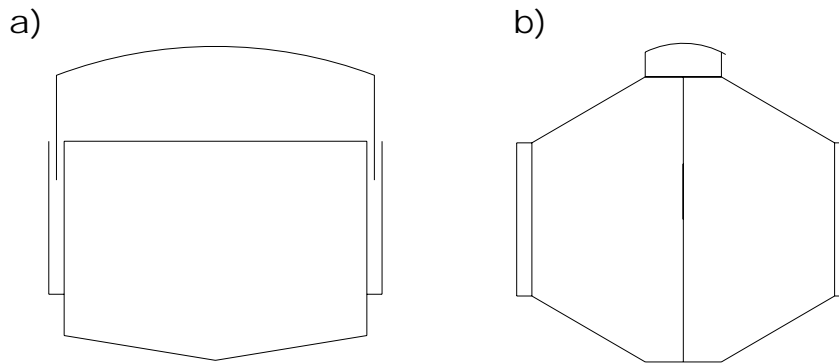


Figura 3-4. a) Geometría Americana; b) Geometría Clásica

La geometría clásica mostrada en la Figura 3-4 b) consiste en un cilindro (diámetro: altura = 1) con pendientes en la parte superior e inferior. Las pendiente de las paredes de la parte superior son de 0.6 a 1.0, mientras que para el de la parte inferior las paredes tienen una pendiente 1.0 a 1.7. Esta geometría favorece el mezclado y homogenización de los lodos.

La geometría europea, mostrada en la Figura 3-5a) consiste en un cilindro con una relación diámetro: altura menor a 1, de poca pendiente de fondo. Esta geometría se ha visto que tiene eficiencias de mezclado parecidas a las de la geometría clásica, teniendo la ventaja de que su construcción es más económica. Por otro lado, esta geometría al tener una pendiente baja en el fondo, limita la elección de los equipos de mezcla.

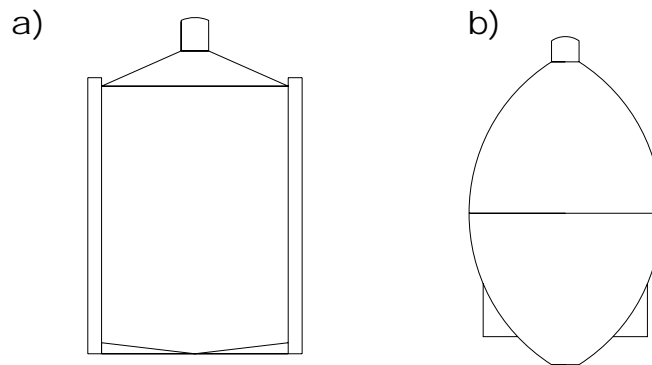


Figura 3-5 a) Geometría europea; b). Geometría en forma de huevo

La geometría en forma de huevo (egg-shaped reactors), mostrada en la Figura 3-5 b) con mayor aceptación reciente en Europa, es una evolución de la geometría europea, la cual fue posible gracias a los avances en los procedimientos constructivos con concreto. Esta geometría presenta condiciones óptimas para la circulación del lodo, por lo que mejora el mezclado y evita la acumulación de sólido, lo que abarata y simplifica su operación. Sin embargo, su construcción es más cara.

3.5.3 Equipos de procesos

Con la finalidad de permitir una operación confiable y segura, al equipar un digestor anaerobio se deben de tomar en cuenta los siguientes elementos (Noyola, 1998):

Rejillas: como es sabido, la corriente de lodos primarios puede contener materiales que son perjudiciales para la operación de los diversos equipos que componen el sistema de digestión de lodos como son plásticos, trapos, fibras, cabellos, etc. Estos materiales tienden a bloquear tuberías y bombas así como aglomerarse debido a la mezcla en el digestor y taponar la salida del lodo o gas. Las rejillas se colocan antes o después del espesador. Se recomienda como espacio entre las barras que conforman las rejillas de 12 mm. Se debe tener en cuenta que si el dispositivo desarenador de la planta de tratamiento que genera los lodos no funciona adecuadamente se tendrán arenas y material fino y denso en el lodo primario, lo que provocará el azolvamiento de los digestores.

3 ANTECEDENTES

Mezclado: para tener una buena homogenización del contenido de los digestores de alta tasa es requerido un sistema de mezclado. El contar con este dispositivo evitará la aparición de zonas muertas, natas y gradientes inadecuados de temperatura. Los métodos convencionales de mezclado son la recirculación de biogás comprimido y la mezcla mecánica.

Recirculación del biogás: se lleva a cabo por medio de un compresor, con el que el biogás es introducido en el digestor para provocar el mezclado de los lodos en digestión. Existen cuatro tipos principales de dispositivos para este fin: inyectores secuenciales, difusores montados sobre el fondo, tubo de tiro (tipo air lift) y cañón de burbuja.

Mezcla mecánica: se lleva a cabo por medio de agitadores mecánicos tipo propela, situados en la mayoría de los casos dentro de un tubo y accionados por un motor fijo sobre la cubierta del digestor. La eficiencia en la operación de este equipo puede verse afectada por fibras, cabellos o trapos atrapados en las propelas y es de difícil mantenimiento.

Manejo del biogás: cuando se elija el sistema de captación y conducción del biogás se debe considerar la importancia de impedir la formación de mezclas que sean explosivas al entrar en contacto con el oxígeno del aire. La mezcla explosiva se da al combinar el volumen de biogás con 5 a 15 volúmenes de aire.

Otro aspecto importante a considerar en el diseño del sistema de conducción de biogás es la presión. Los digestores operan a bajas presiones, 300 a 400 kg/m² medidos en la fase gaseosa del digestor, por lo que cualquier taponamiento o restricción al flujo puede provocar un mal funcionamiento del sistema.

Los equipos y accesorios empleados para una correcta recolección y conducción del biogás se enlistan a continuación.

- Arrestaflamas
- Válvulas contra presión y vacío
- Válvulas check
- Trampa de condensados

3 ANTECEDENTES

Reguladores de presión

Manómetros

Antorchas

Arrestaflamas. Este dispositivo evita que una posible flama se propague a lo largo del conducto de biogás y que pueda llegar a la zona de recolección del digestor provocando un estallido. Se recomienda colocar los arrestaflamas en las válvulas contra presión y vacío sobre la cubierta del digestor y en la línea, justo antes del dispositivo de flama (caldera, motor de combustión interna, antorcha, etc.). Este dispositivo debe contar con un termo fusible con el objeto de bloquear el flujo de biogás en caso de que la flama llegue a ese punto.

Válvula contra presión y vacío. Ante eventuales cambios de presión positivos o negativos este dispositivo actúa de tal manera que evita daños en la estructura del digestor, principalmente en su cubierta. Deben instalarse en la cubierta y cerca de la antorcha.

Válvulas check. Dispositivos que evitan la entrada de aire al digestor a través de las tuberías, ya que permiten el paso en un solo sentido.

Trampa de condensados. Al enfriarse el biogás, su alta humedad se condensa y se forman gotas dentro de la tubería o sus accesorios. Este dispositivo tiene la función de retener y expulsar esta agua; el número de unidades a instalar están en función de la longitud de la tubería y los cambios de dirección, de manera importante en cambios de dirección vertical.

Reguladores de presión. Se destina a estos dispositivos mantener una presión constante en los elementos del sistema que así lo requieran, como pueden ser el calentador en el dispositivo de calentamiento, una caldera o inclusive una antorcha.

Manómetros. Utilizados para medir la presión en distintos puntos de la línea de conducción del biogás y son de gran utilidad para detectar taponamientos y bloqueos en la tubería.

3 ANTECEDENTES

Antorcha. Estos dispositivos son de gran utilidad en la prevención de la contaminación, riesgos de explosión y generación de olores desagradables. Cuando el biogás es utilizado como combustible en el sistema de digestión, puede haber un exceso de producción, mismo que se tendrá que quemar en este dispositivo llamado antorcha evitando las molestias antes mencionadas.

Cubierta del digestor. Las cubiertas en los digestores anaerobios tienen múltiples funciones:

Evita el contacto del oxígeno del aire con el lodo en digestión.

Evita el escape de biogás a la atmósfera, lo cual reduce significativamente los riesgos de explosión y los malos olores. Permite coleccionar el biogás para su aprovechamiento y se controla la emisión de este gas de efecto invernadero.

Aísla térmicamente al digestor reduciendo la pérdida de calor.

Los tipos de cubiertas pueden agruparse en:

Cubiertas fijas.

Cubiertas flotantes.

Cubiertas almacenadoras de biogás.

Las cubiertas fijas son de diferentes tipos en función de su arreglo y del material con el que están fabricadas. Las construidas en concreto toman forma de bóvedas, conos o losas. Uno de los principales inconvenientes es que se pueden presentar fisuras que permitirían el escape de biogás pudiéndose producir una explosión, además de los riesgos de contaminación y los malos olores.

Las cubiertas fijas de acero están formadas por placas de este material teniendo como grosor mínimo 6mm. Se debe tener en cuenta las propiedades de este material y procurar un arreglo que permita la expansión que no provoque esfuerzos estructurales y fisuras en el digestor.

Cubiertas flotantes. Éstas se depositan directamente sobre el espejo de agua en el digestor flotando. El biogás es extraído a través de una cámara cilíndrica central. Este

3 ANTECEDENTES

tipo de cubierta tiene la ventaja de que el volumen del digestor puede variar a través del tirante dentro de cierto intervalo en caso de problemas de operación.

Cubiertas almacenadoras de biogás. Son una variación de las cubiertas flotantes con la diferencia que estas se encuentran flotando en el biogás. El volumen de almacenamiento del biogás se encuentra en el mismo digestor.

3.5.4 Producción y manejo del biogás

La carga orgánica es el factor principal a tomar en cuenta en la producción de biogás ya que ésta es proporcional a la carga orgánica. Y si la carga orgánica es alta y existe una buena digestión se necesitará de un espacio considerable para el almacenamiento del biogás producido.

Las características del biogás no varían marcadamente con la carga orgánica ni con el tiempo de retención celular en el digestor siempre que estos se ubiquen en el intervalo adecuado para la digestión anaerobia. El biogás se compone generalmente de entre 65 a 70% de metano (CH_4), 25 a 30% de dióxido de carbono (CO_2) y trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2) y ácido sulfhídrico (H_2S) (Noyola, 1998). La producción de metano reportada en la literatura para digestores de lodos de alta tasa (Malina y Pohland, 1992) es de 0.75 a 1.12 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgSSV}_{\text{eliminados}}$.

3.6 Espumas y natas en digestores anaerobios

La espuma es un subproducto sólido producido durante el tratamiento de residuos que usualmente se define como cualquier material que flote en la superficie de reactores y puede estar constituida por grasas, aceites, ceras, restos de comida, cáscaras de frutas y vegetales, cabellos, papel, algodón, colillas de cigarrillos, materiales plásticos, partículas de arenas y materiales similares (Metcalf and Eddy, 2003). En digestores anaeróbios aplicados a la producción de biogás a partir de desechos de animales, la espuma se caracteriza como una mezcla de cabellos de animales, pedazos de piel, fibras y otros materiales flotantes (Raman et al., 1989) constituida en una cama gelatinosa espesa, extremadamente pegajosa y oleosa, cubierta con una fina costra que contiene pedazos de partículas gruesas, lodo granular muerto y otras partículas más finas (Figura 3-6 y Figura 3-7) .



Figura 3-6. Aspecto de una espuma formada en un reactor anaerobio; espuma con coloración verdosa (Queiroz et al, 200x).



Figura 3-7. Aspecto de una espuma formada en un reactor anaerobio; espuma con coloración gris (Queiroz et al, 200x).

Barber (2005) Afirma que las perturbaciones en un digestor anaerobio pueden llevar a la producción excesiva de biosurfactantes, por ejemplo los polímeros extra celulares que disminuyen la tensión superficial de la masa líquida, facilitando la acumulación de material en la superficie del digestor. Por su parte, Raman, (1989) afirma que el principal problema de la espuma generada en los digestores anaeróbios es la producción no uniforme de biogás, además de que la acumulación de la espuma en la superficie del digestor puede comprometer la eficiencia del tratamiento si el material flotante se desprende y alcanza los dispositivos de salida del efluente o del biogás.

3.6.1 Teoría de la formación de espuma

Las espumas y natas son formadas por miles de burbujas que se acumulan en la superficie del espejo de agua del reactor anaerobio. El gas dentro de ellas constituye la mayor parte del volumen de tal espuma, por lo tanto la densidad de la espuma se aproxima a la del gas y no a la del líquido. Las burbujas están separadas sólo por una pequeña película muy elástica. La formación de espuma está afectada por las propiedades del líquido tales como tensión superficial, viscosidad y fuerza iónica. La habilidad de los líquidos para formar espuma muestra una obvia correlación con la actividad superficial de los solutos. Las espumas persistentes solo se presentan con

3 ANTECEDENTES

solutos que disminuyen fuertemente la tensión superficial. La estabilidad de las espumas persistentes está asociada con la elasticidad de la película en la interfase de la burbuja y la formación de capas gelatinosas en la superficie. La elasticidad de la película es la habilidad de que tiene para resistir los procedimientos de adelgazamiento. Cuando el área potencial de ruptura se agranda, la concentración del surfactante en la superficie decrece y la tensión superficial incrementa. La restauración de la película solo ocurrirá si la velocidad para alcanzar el equilibrio de tensión superficial por la adsorción del surfactante de la solución es menor que la migración de la superficie.

La vida de las espumas está reforzada por viscosidades superficiales altas que resultan de la interacción de las fuerzas entre moléculas surfactantes adyacentes en la superficie del líquido. Las capas superficiales de surfactantes naturales tales como proteínas tienen viscosidades superficiales muy altas como las saponinas que presentan un comportamiento viscoelástico. Entre otros factores, también está la presencia de compuestos volátiles que influencia la estabilidad de la espuma. La estabilidad depende fuertemente de la diferencia de temperatura entre la fase gaseosa y líquida. Altas temperaturas incrementan la presión en los canales de Gibbs-Plateau dando como resultado la inestabilidad de la burbuja. El volumen de la espuma y su estabilidad varían fuertemente con el pH. La estabilidad máxima de la espuma en una solución de proteínas se espera en su punto isoeléctrico. (Vardar, 1998)

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La experimentación se llevó a cabo en un digester no convencional a escala piloto, construido en un proyecto previo (Mancebo del Castillo, 2001 y Pérez, 2004) en las instalaciones piloto de la planta de tratamiento de Aguas Residuales del Cerro de la Estrella (PTAR-CE), perteneciente al Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SCAM), ubicada en la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal y el análisis de las muestras obtenidas en el digester se realizó en el Laboratorio de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

4.1 Descripción del prototipo.

El digester anaerobio de lodos diseñado bajo el concepto UASB se operó durante siete meses. Al final de este periodo se estableció un mes y medio para la evaluación de la formación de una nata en la parte superior del digester, fenómeno observado al término de un estudio anterior (Barrios, 2007). Las características y dimensiones del digester se presentan en la Figura 4-1 y en la Figura 4-2.

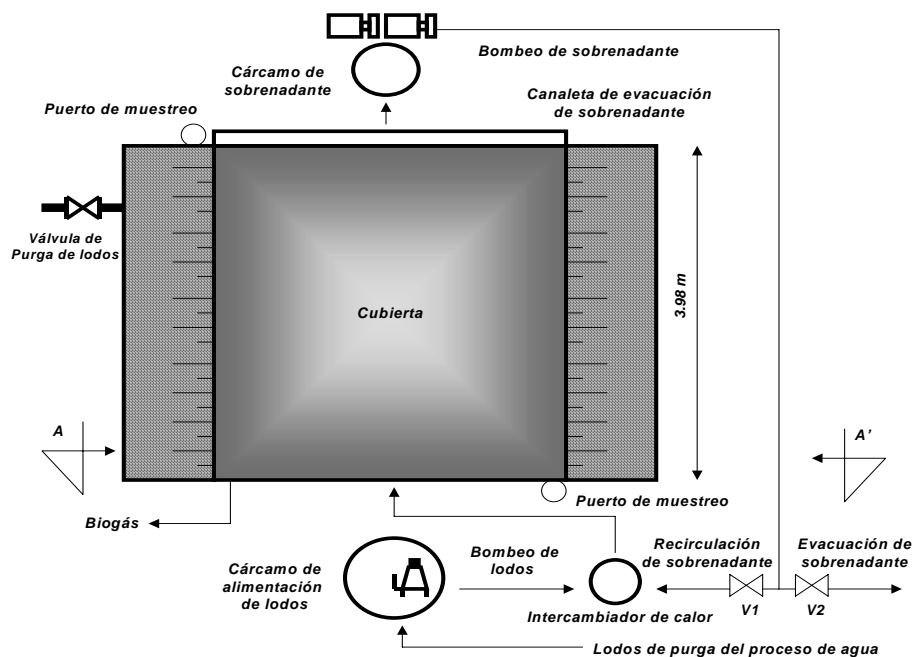


Figura 4-1. Vista en planta del digester anaerobio de lodos ubicado en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua residual de Cerro de la Estrella.

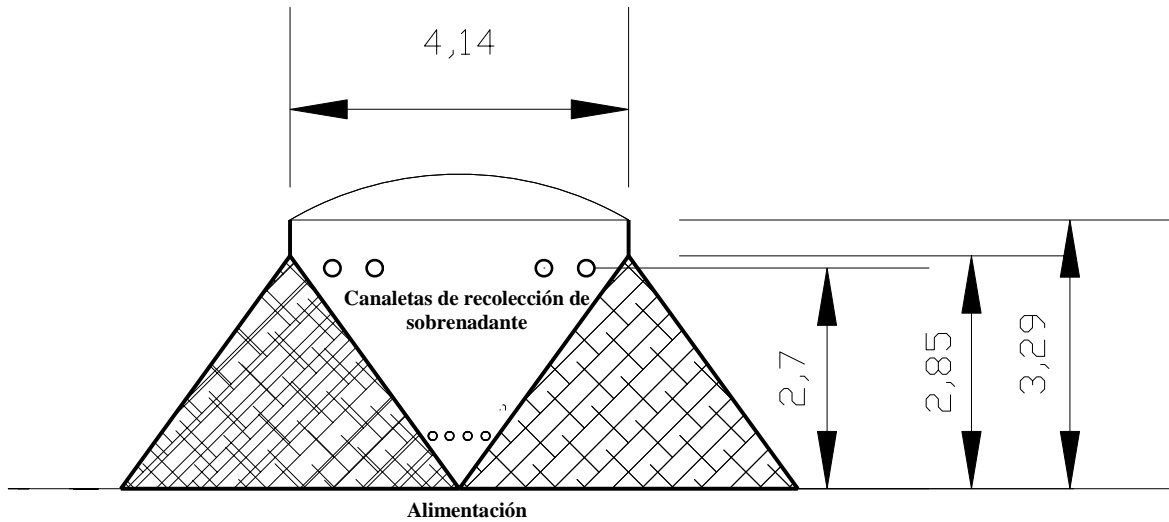


Figura 4-2. Vista en corte transversal del digestor anaerobio de lodos ubicado en las instalaciones de Planta de Tratamiento de Agua Residual de Cerro de la Estrella.

El digestor anaerobio mostrado en la Figura 4-2 fue construido con ferrocemento que por sus propiedades resulta el material más adecuado para una construcción de esta naturaleza. El ferrocemento es un material de poco espesor hecho con mortero muy rico en cemento y mallas de alambre de acero de pequeño diámetro, lo que ofrece una resistencia notable y un rango elástico. El digestor se diseñó para una carga másica de 2.5 kg SSV/m³d alimentada en un lote por día y para funcionar bajo el rango de mesofilia (33 a 38 °C). Tiene un volumen de 22.8 m³, de los cuales 18 m³ son para contener los lodos y el volumen restante para el almacenamiento del biogás. Se tenía cubierto con una lona de PVC como se puede apreciar en la Figura 4-4 , reforzada con hilos de nylon, la cual se retiró para dar seguimiento a la formación de la nata.



Figura 4-3. Digestor anaerobio. Vista frontal.



Figura 4-4. Lona de PVC. Cubierta del digestor

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La alimentación al reactor consistió de una mezcla de lodos primarios y secundarios que eran bombeados desde un registro ubicado al final del tren de tratamiento de la Planta de Cerro de la Estrella y aproximadamente a 25 metros de las instalaciones donde se encontraba el digestor experimental. Este registro es parte de una línea de conducción de los lodos provenientes de la purga de los sedimentadores primarios y secundarios del tren de tratamiento y de las aportaciones de los productos de desecho de la operación de la planta (desnatado del espejo de agua de los sedimentadores primarios, lavado de vertedores de los vasos sedimentadores, lavado de instalaciones, etc.). La alimentación se hacía mediante una bomba sumergible de 1.5 HP dentro del registro hasta el cárcamo de alimentación ubicado en la parte norte del digestor.



Figura 4-5. Bomba de extracción de lodo. Registro de lodos primarios



Figura 4-6. Registro de lodos primarios. Línea de conducción de lodo primario.

Debido a que en el registro se recibían diferentes corrientes del sistema de tratamiento se encontró que el lodo extraído presentaba una baja concentración en sólidos por lo que el volumen en la alimentación del digestor era de 5 a 15 m³, provocando que la alimentación del digestor resultara engorrosa y tardada. Por tal motivo, se decidió buscar alternativas de abastecimiento del lodo primario en distintos puntos de la línea de drenaje mencionada, encontrando que lo más factible era alimentar desde los vasos de los sedimentadores primarios al inicio del tren de tratamiento de agua residual (Figura 4-5 y Figura 4-6). Para ello se colocó una línea de tubería de poliducto de 1¹/₂” de diámetro, de aproximadamente 350 m hasta llegar al cárcamo de alimentación del digestor. Para el bombeo del lodo se empleó la misma bomba de 1.5 HP. Por su parte el lodo secundario se obtenía de la tubería de retorno de lodos de purga del proceso aerobio mediante una línea de conducción que llegaba al cárcamo de alimentación.

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL



Figura 4-7. Sistema de calentamiento.



Figura 4-8. Canaleta de recolección de sobrenadante y cárcamo de recirculación de sobrenadante.

El cárcamo de alimentación tiene una capacidad de 2.7 m^3 y está construido de ferrocemento. En él se depositan los lodos primario y secundario, donde se mezclan por efecto de la caída libre de la descarga. El lodo se introduce al digester mediante una bomba de 0.75 HP.

El lodo se le somete a una elevación de temperatura en un sistema de calentamiento constituido por un intercambiador de calor (Figura 4-7), un calentador casero y una bomba centrífuga de 0.5 HP para el recirculado del agua del calentador al intercambiador. Dicho sistema se calentaba con gas LP desde un tanque estacionario con capacidad de 300 litros para llevar al lodo a la temperatura de $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

El lodo se introducía al digester mediante un arreglo de tuberías colocadas de manera paralela entre sí y con descarga a diferentes longitudes para asegurar la uniformidad de la alimentación en el digester y por ende un mejor contacto entre el sustrato y la biomasa.

Las tuberías de alimentación que se colocaron a lo largo en el interior del digester son de acero al carbón cédula 40. De igual manera se utilizó este tipo de tubería para la recirculación del sobrenadante y el sistema de calentamiento los cuales se cubrieron con un aislante térmico a base de poliestireno para evitar las pérdidas de calor.

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El sobrenadante desplazado durante la alimentación se recolectaba en un par de canaletas de PVC ubicadas en el interior del digestor que lo conducían hasta otra canaleta de recolección ubicada en el exterior del digestor para que finalmente se vertiera al cárcamo de recirculación que se ubica en la parte sur del digestor (Figura 4-8). En este cárcamo el sobrenadante era bombeado ya sea para recircularlo o para evacuarlo durante la alimentación. El sobrenadante era recirculado por medio de un par de bombas centrífugas de 1 HP que operaban en forma alternada y por medio de la manipulación de las válvulas se hacía el cambio a evacuación hacia un registro de la planta de tratamiento. Posteriormente, se tuvo la necesidad de cambiar las bombas centrífugas horizontales de recirculación del sobrenadante por bombas sumergibles de 1 HP de capacidad que trabajaban de manera intermitente siendo activadas con un interruptor de flotador de acuerdo al nivel del cárcamo.

4.2 Parámetros de control y respuesta

Durante la operación del digestor se designó la determinación de parámetros de control como el pH, la relación de alcalinidades α y alcalinidad siendo estos buenos indicadores de la respuesta del digestor ante la carga a la que somete.

A partir de la concentración de sólidos suspendidos volátiles en el influente, la cama de lodos y el sobrenadante, se observó la evolución en el porcentaje de los sólidos suspendidos volátiles, que nos permite saber de la eficiencia y evaluar al reactor. En cuanto a la evaluación de las características de compactación se emplearon el índice volumétrico de lodo (IVL) y la velocidad de sedimentación.

4.3 Metodología de muestreo

Los lodos primarios fueron muestreados en el cárcamo de alimentación mientras que los lodos secundarios se muestrearon en la salida de la línea de alimentación que proviene de la línea de lodos de retorno de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella. Igualmente, se muestreó directamente la mezcla de lodos alimentados al digestor. El sobrenadante fue muestreado en la canaleta de recolección del mismo, la purga por medio de la apertura de la válvula de purga de lodos, y el lodo que conforma la cama de lodos del digestor fue muestreado a partir de la obtención de núcleos extraídos por medio de dos puertos de muestreo instalados especialmente para ese fin.

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.4 Técnicas analíticas

Para evaluar el funcionamiento del digestor se emplearon métodos registrados en el Standard Methods (APHA, 1995), además del Manual de Técnicas del Laboratorio de la Coordinación de Biotecnología Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En la Tabla 4-1 se señalan los parámetros analizados, las técnicas empleadas, la frecuencia de determinación y el punto de muestreo.

Tabla 4-1. Parámetros para el monitoreo del funcionamiento del digestor

Parámetro	Técnica	Frecuencia	Punto de Muestreo
Sólidos Suspendidos Totales (SST, mg/L)	SM	Diariamente	Influyente
			Sobrenadante
		Mensual	Cama de lodos ⁺⁺
pH (unidades de pH)	Potenciómetro	Diariamente	Influyente
			Sobrenadante
Temperatura (°C)	Termómetro	Diariamente	Influyente
			Sobrenadante
	Termopar		Cama de lodos ⁺⁺
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	SM	Diariamente	Influyente
			Sobrenadante
Relación de alcalinidades (adimensional)	CBPA-II	Diariamente	Influyente
			Sobrenadante
Índice Volumétrico de Lodos (mL/gSST)	SM-II	Mensual	Cama de lodos ⁺⁺
Velocidad de sedimentación (m/h)	SM-II	Mensual	Cama de lodos ⁺⁺

SM Técnica normalizada del Standard Methods

SM-II Técnica normalizada del Standard Methods y adaptada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

CBPA-II Procedimiento adaptado por la Coordinación de Biotecnología Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM

*Manual de técnicas de laboratorio de la Coordinación de Biotecnología Ambiental de la UNAM.

+Los análisis efectuados a la purga se realizaron únicamente cuando se efectuó ésta.

++ Análisis realizados tres veces por semana.

4.5 Evaluación y control de espumas y natas

Durante la operación del digestor se designó un intervalo de tiempo para observar, y cuantificar las espumas y natas formadas en el digestor piloto reportadas en un trabajo anterior sobre el mismo sistema (Barrios, 2007), así como evaluar técnicas para su control. El periodo de observación y cuantificación del crecimiento de natas fue de 57

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

días. En este periodo se suspendió la alimentación del digestor (a partir del día 10 de observación) y la operación se limitó a recircular el sobrenadante manteniendo la temperatura del digestor cercana a los 30° C. Además de la observación del cambio del grosor de la nata se hicieron cuantificaciones de sólidos en todas sus formas..

Para una mejor cuantificación del crecimiento del espesor de las natas se decidió retirar la cubierta de lona del digestor lo que permitió observar una nata con un espesor de 20 cm aproximadamente, la cual se retiró del reactor con la finalidad de observar la formación y el desarrollo de una nueva capa de nata (Figura 4-9 y Figura 4-10).



Figura 4-9. Imagen donde se muestra el comienzo del retiro de la nata



Figura 4-10. Espejo de agua del digestor después de que se retiró la nata en la misma área de la figura anterior.

Una vez que se retiró la nata se llevaron a cabo una serie de lecturas de su grosor. Para lo anterior fue necesario implementar un dispositivo que permitiera hacer la observación. El dispositivo consistió en un cilindro de vidrio de 30 cm de diámetro por 55 cm de profundidad cerrado en la parte inferior (Figura 4-11 y Figura 4-12) que permitió observar el grosor de la nata que se formaba después de haberse precipitado el día anterior. La precipitación de la nata se llevó a cabo de manera mecánica agitándola o sometiéndola chorros de agua a presión.

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL



Figura 4-11. Dispositivo utilizado para cuantificar el grosor de la nata



Figura 4-12. Cuantificación del grosor de la nata en el digestor UASB

Para conservar el calor en el digestor fue necesario colocar una cubierta directamente sobre el espejo de agua (día 22 del periodo de observación). El material utilizado fue polipropileno de baja densidad en forma de hoja. Este material presenta las siguientes propiedades: resistente al agua, neutralidad química, peso bajo, resistente a impactos, aislante térmico, flexible, no tóxico, no abrasivo, impermeable, no corrosivo, resistente a los solventes y antiestático. Entre las aplicaciones generales que se le da a este material, está la transportación de productos, en muebles de casa y oficina, electrónicos, productos de agricultura, construcción, instrumentos, musicales, alimentos congelados y equipo médico, además de aislante térmico y acústico entre otros. De este material se colocaron 4 tiras de 110 por 400 cm cada una que cubrían completamente el espejo de agua del digestor y que al estar separadas, permitieron observar la nata en diferentes regiones del espejo de agua y facilitaron su remoción y precipitación (Figura 4-13 y Figura 4-14).

Durante el periodo de observación del crecimiento de la nata se observó que la hidráulica de la alimentación (por lotes) tenía un papel importante en la formación de la nata, lo cual será discutido en el capítulo siguiente. Para resolver esto, se decidió hacer un cambio en este aspecto, pasando de alimentación por lotes a semicontinua. Para ello, fue necesaria la instalación de una bomba peristáltica en sustitución por la bomba centrífuga que permitió una alimentación de los 8 m³ del influente en periodos de 15 minutos cada hora durante las 24 horas del día con un gasto de 18 litros por minuto en

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

lugar del patrón anterior que introducía la totalidad del volumen alimentado diariamente en sólo una hora con treinta minutos.



Figura 4-13. Digestor UASB sin la cubierta aislante



Figura 4-14. Digestor UASB con la cubierta aislante (polifom)

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados de la operación del reactor que a continuación se describen, se basan en la alimentación en forma batch de la mezcla lodos primarios y secundarios provenientes del sistema de tratamiento de agua residual, condición que permaneció por aproximadamente 6 meses de los siete que duró la experimentación. En la fase final del experimento se modificó el régimen a semicontinuo, mediante el cambio de una bomba centrífuga por una peristáltica que permitía distribuir a lo largo del día el flujo alimentando 8 m^3 de la mezcla de lodos (2 m^3 de primario y 6 m^3 de secundario).

5.1 Influyente

El influente alimentado al digester consistía en una mezcla de lodos primarios y secundarios. La caracterización de estas corrientes se realizó en forma individual verificando parámetros tales como sólidos suspendidos, pH, relación de alcalinidades, alcalinidad así como carga alimentada.

5.1.1 Sólidos suspendidos

En la gráfica de la Figura 5-1 se presenta el comportamiento de los sólidos suspendidos en sus tres formas (SST, SSF y SSV) del lodo primario alimentado. En esta se puede observar que el contenido de sólidos suspendidos fue muy variable a lo largo de la operación, teniendo como concentración promedio de sólidos suspendidos volátiles 7.089 g/L . La variación de la fracción volátil de sólidos suspendidos totales alimentados al digester se presenta en la Figura 5-2 con un valor promedio de 63.28% . Este valor se encuentra en la parte baja del intervalo de valores comúnmente encontrados en este tipo de lodos (ver Tabla 4-1). Estas importantes fluctuaciones en la concentración del lodo se explican por la dificultad de captar el lodo primario desde el registro donde se tenía la bomba de alimentación, así como a la operación de los sedimentadores primarios, que se purgaban en dos periodos al día. Además, se presentaron problemas en el sistema de rastras que llevan al lodo sedimentado en el fondo del sedimentador hacia las tolvas, con lo que se tuvieron concentraciones de sólidos que variaron de 1.13 g SST/L hasta de 21.66 g SST/L . En las dos gráficas mencionadas se pueden observar constantes discontinuidades (puntos aislados)

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

a lo largo de la experimentación que se deben a interrupciones en el suministro de lodo primario o secundario causadas por diversas situaciones: interrupciones del suministro eléctrico, reparación de equipo tanto de la PTARCE como de la planta piloto. Esta observación se tiene que aplicar al resto de las graficas con excepción de las que reportan el comportamiento de la temperatura en el digestor.

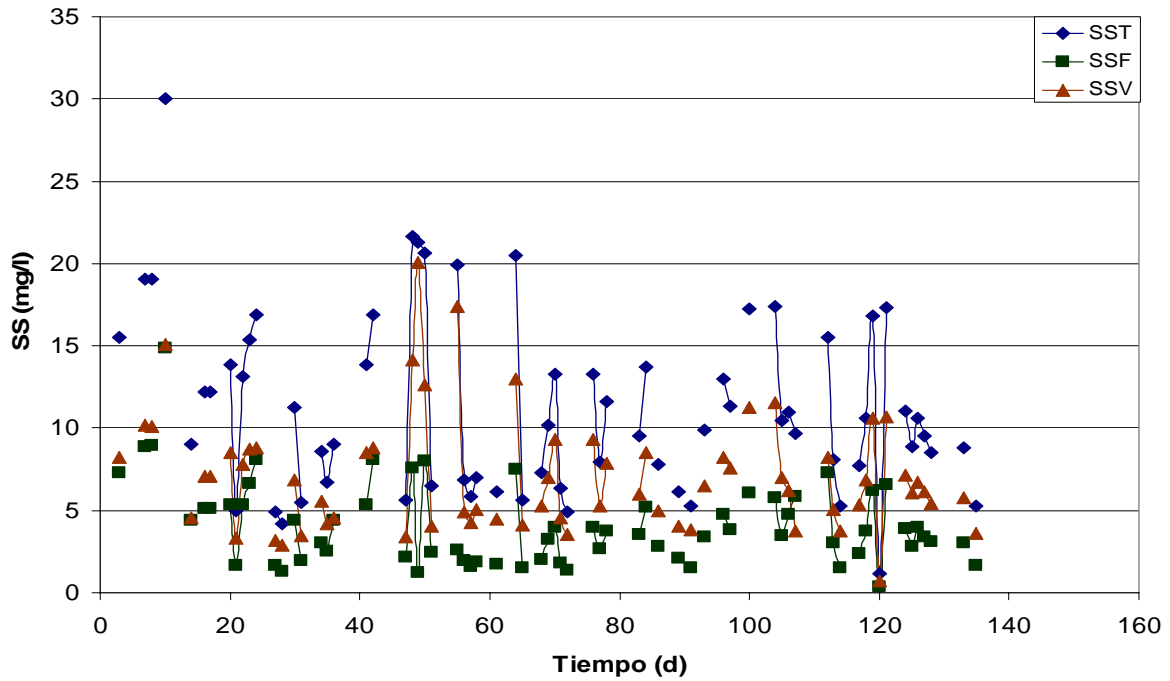


Figura 5-1. Sólidos suspendidos en lodo primario.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

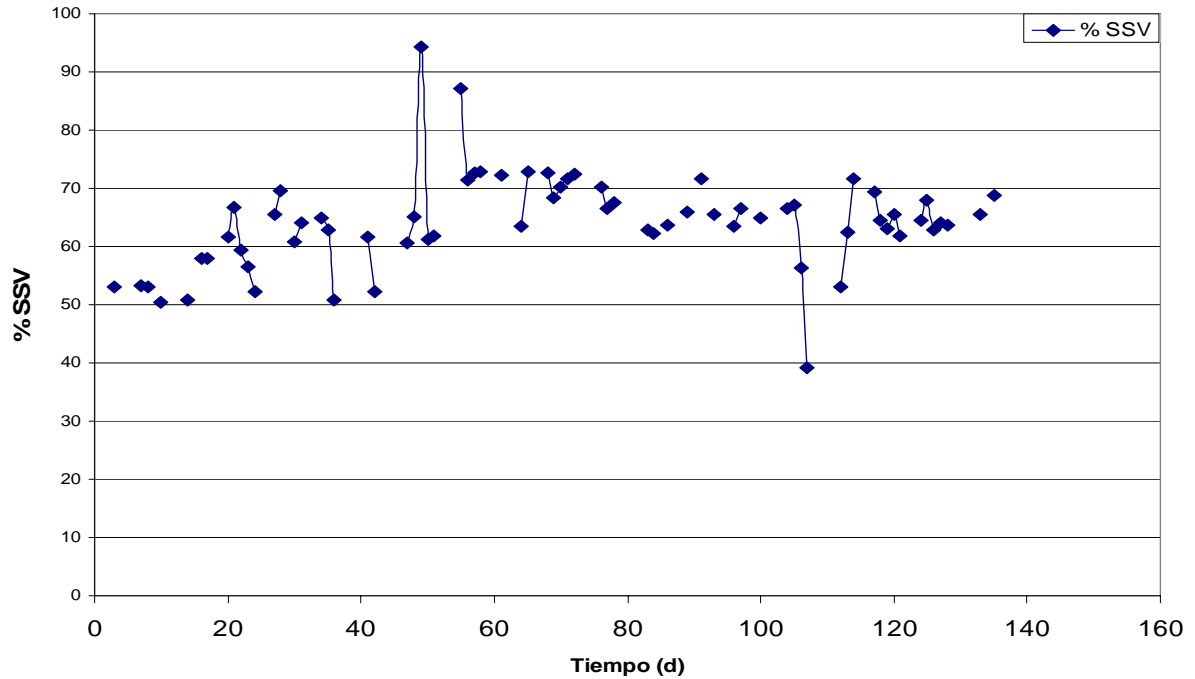


Figura 5-2. Porcentaje de sólidos suspendidos volátiles en lodo primario.

En la gráfica de la Figura 5-3 se presenta el comportamiento de los sólidos suspendidos en el lodo secundario. Se puede notar una menor concentración de SST comparada con la de los lodos primarios así como una mayor consistencia de los valores durante la operación, lo que podía esperarse, a pesar del que al inicio se presentaron picos de concentración de hasta 27.99 g SST/L. La concentración más baja de sólidos suspendidos totales fue de 2.61 g/L y el promedio fue de 5.122 g/L; para los sólidos suspendidos volátiles fue de 3.887 g/L.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

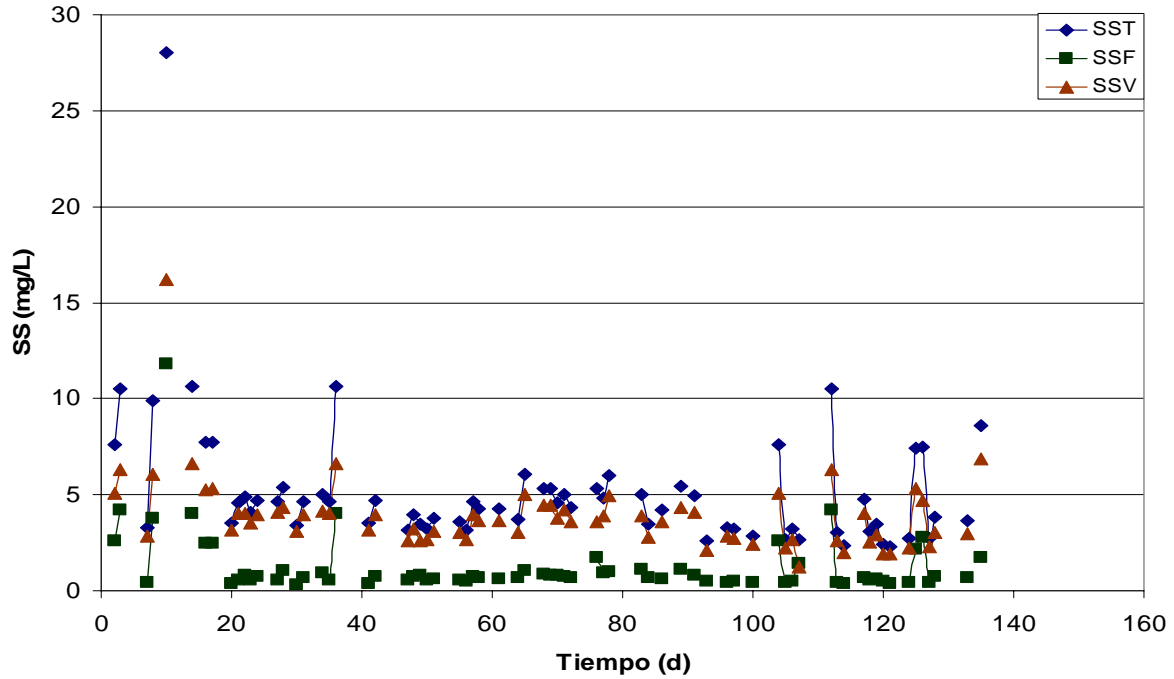


Figura 5-3. Sólidos suspendidos en lodo secundario.

La Figura 5-4 muestra la fracción volátil de sólidos suspendidos en el lodo secundario. Estos se encuentran en promedio de 76 %, comparativamente mayor que el de los SSV del lodo primario y que es de esperarse, debido a que estos lodos provienen de la recirculación de proceso biológico de lodos activados y que en su mayoría son células.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

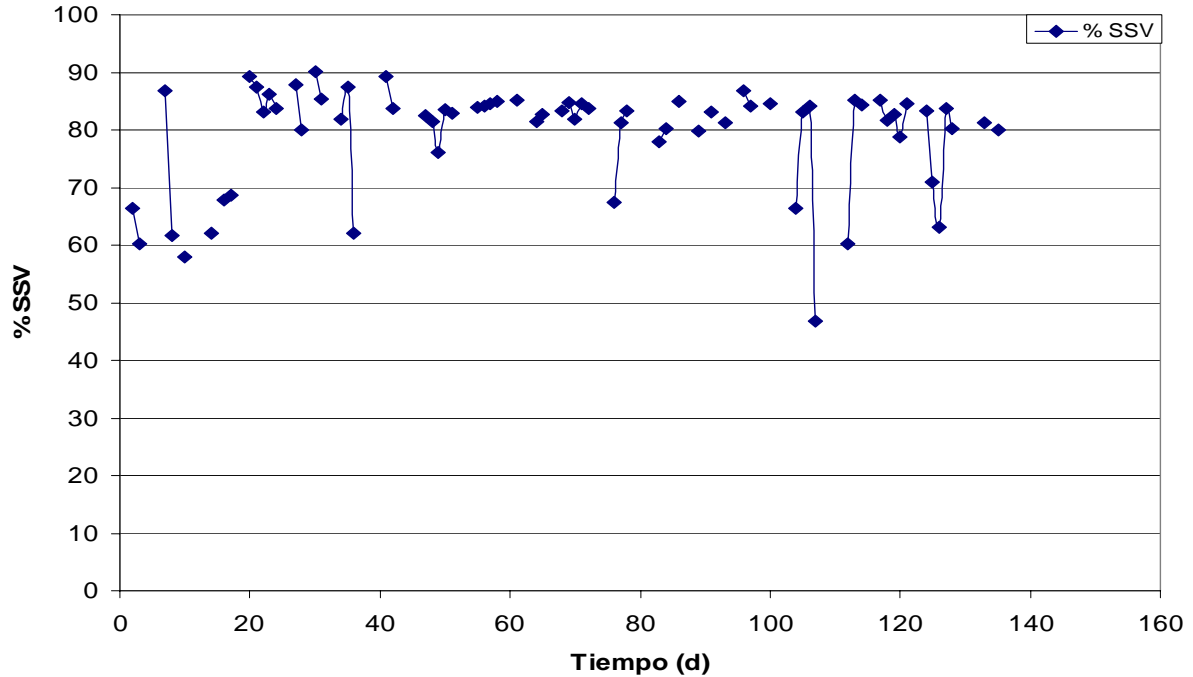


Figura 5-4. Fracción volátil de sólidos suspendidos en lodo secundario.

5.1.2 Carga orgánica alimentada

La carga orgánica volumétrica (B_v) en promedio alimentada fue de $2.07 \text{ kg SSV/m}^3\text{d}$ cercana a la carga orgánica de diseño del digester de $2.5 \text{ kg SSV/m}^3\text{d}$. La gráfica de la Figura 5-5 muestra el comportamiento de la carga orgánica volumétrica a través del tiempo de experimentación teniendo variaciones desde $0.77 \text{ kg SSV/ m}^3\text{d}$ (día 120) hasta $3.1 \text{ kg SSV/ m}^3\text{d}$ al día 49. Tal variación se debe a la ya mencionada irregularidad en la concentración de sólidos suspendidos de las dos corrientes de lodos que conformaron el influente. Aun así, la carga alimentada está dentro del intervalo de cargas representativas de los digestores convencionales de alta tasa, de $1.6 \text{ kgSSV/m}^3\text{d}$ a $3.2 \text{ kgSSV/m}^3\text{d}$ (Noyola, 1998).

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

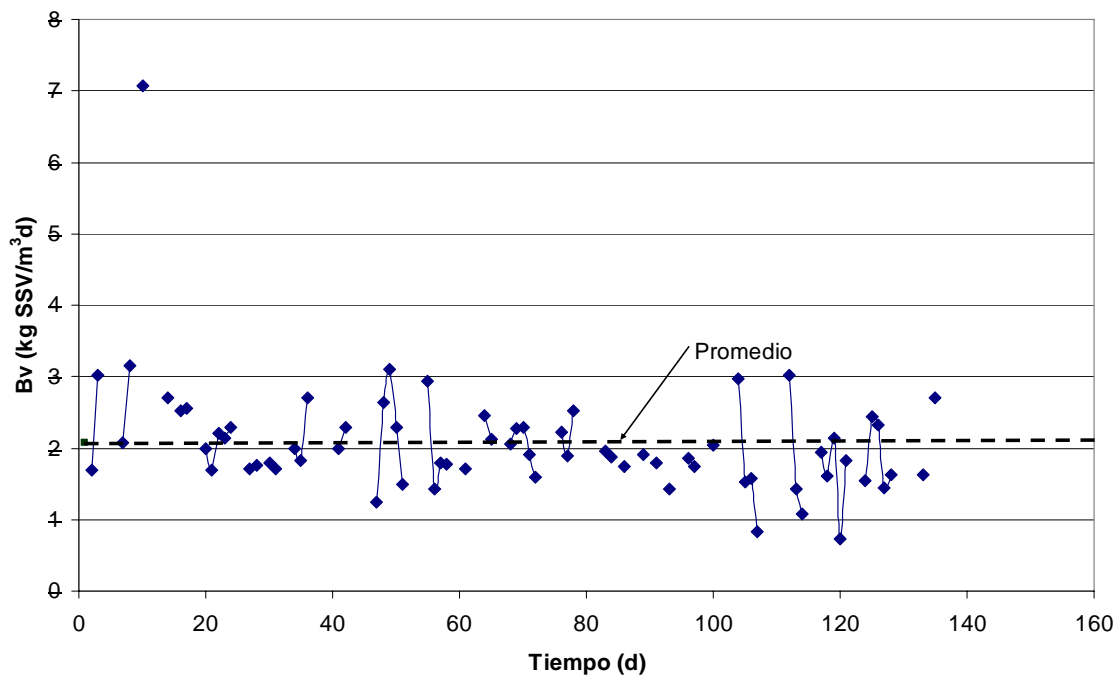


Figura 5-5. Carga orgánica volumétrica alimentada al digestor.

5.1.3. Relación de alcalinidades y pH

La evolución de la relación de alcalinidades α y la alcalinidad del lodo primario se representan en la Figura 5-6, donde se aprecia que se presentó una importante variación durante la operación del digestor, desde 0.11 (día 133) hasta 0.5 (día 55), con un valor promedio de 0.31. Estos valores indican que este lodo se encuentra en la etapa de hidrólisis debido quizá al tiempo que permanece en los sedimentadores ya que solo se purgan de una a dos veces al día entre semana y el fin de semana sin purgas. La alcalinidad del lodo se incrementa hasta valores del orden de los 1268 mg CaCO_3/L (día 104, fig. 5.6) lo que pone de manifiesto que existe cierta capacidad amortiguadora.

El comportamiento de la relación de alcalinidades y alcalinidad en el lodo secundario se muestra en la Figura 5-7. En ella se observan los valores de alfa en el lodo secundario con un promedio durante la experimentación de 0.53. El valor más alto se registró en el día 107, de 0.75 y el valor más bajo fue de 0.148 en el día 133. La variación de estos parámetros fue menor que la presentada en el lodo primario, aspecto que podía esperarse. En lo que respecta a la alcalinidad, esta muestra valores bajos y como promedio 307.36 mg CaCO_3/L .

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

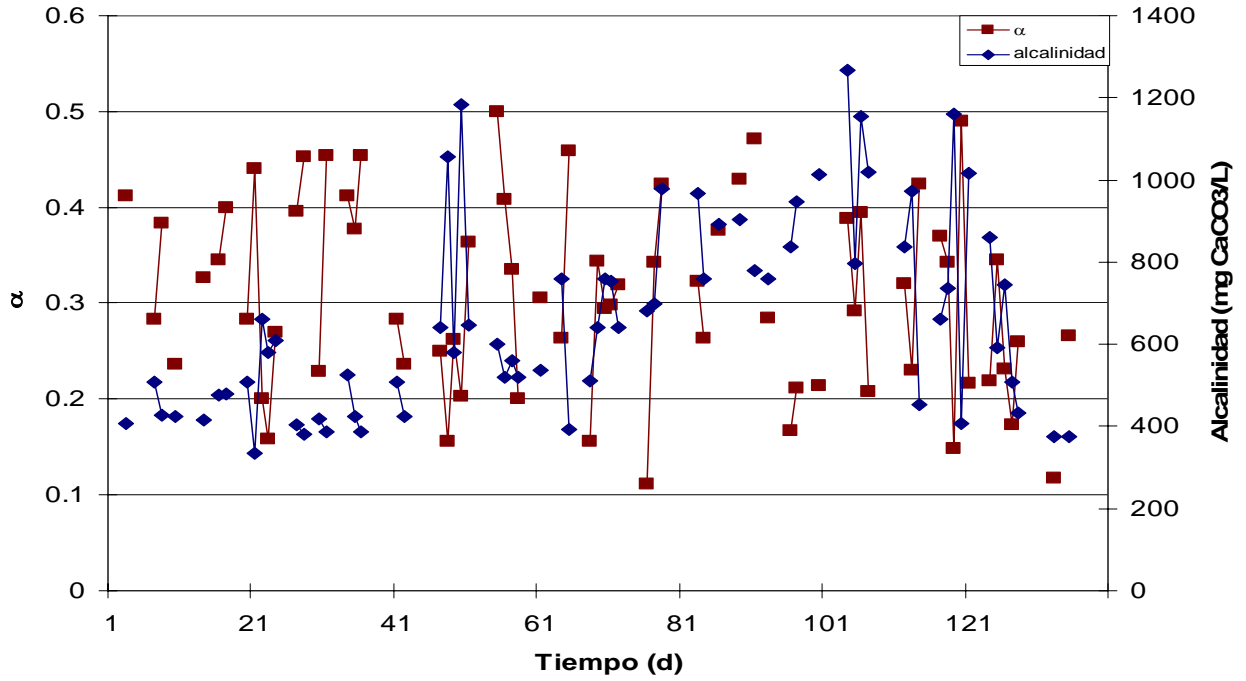


Figura 5-6. Relación de alcalinidades α y alcalinidad en lodo primario

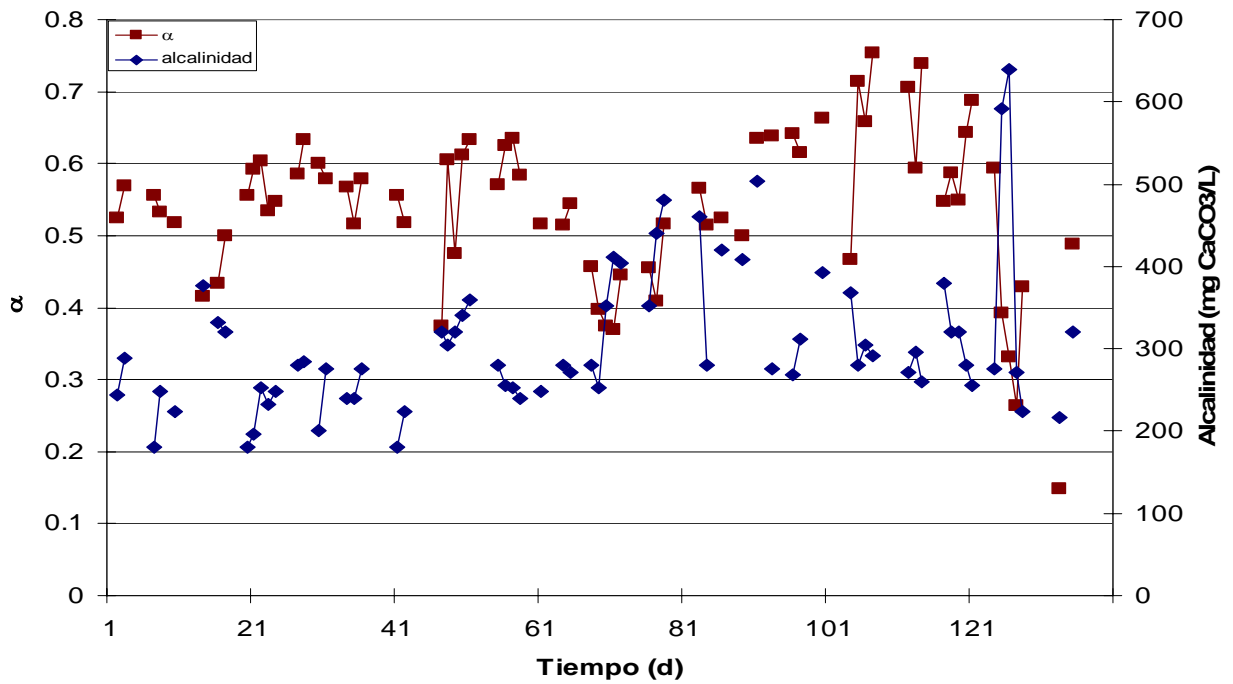


Figura 5-7. Relación de alcalinidades α y alcalinidad en lodo secundario.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se ha mencionado en la literatura, los digestores anaerobios operan satisfactoriamente a valores de pH que van de 6.2 a 7.8, teniendo como rango óptimo un pH entre 7.0 y 7.2 (Noyola, 1998). El pH promedio en el lodo primario y secundario fue de 6.45 y 6.66, respectivamente. Con base en la Figura 5-8 se puede comentar que los valores registrados están dentro de los rangos que la literatura marca para lodos provenientes de agua residual (Metcalf and Eddy, 2003).

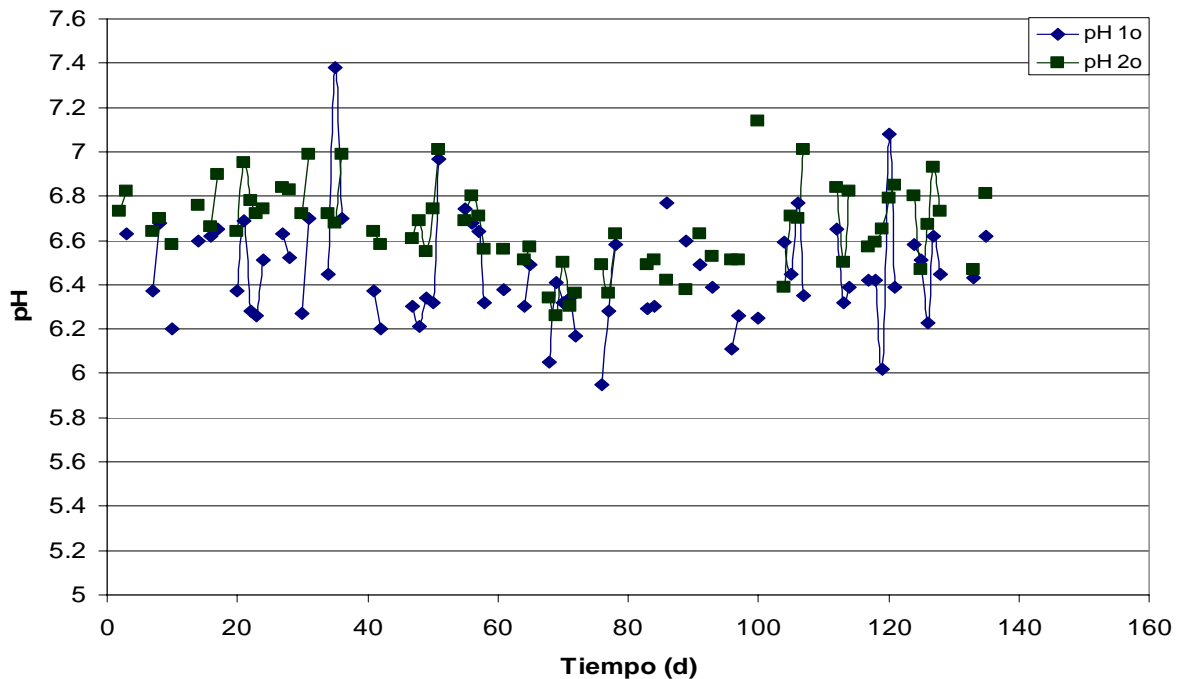


Figura 5-8. pH en lodo primario y secundario.

5.2 Sobrenadante

El seguimiento que se le dio al sobrenadante durante la operación del digestor fue mediante la determinación de sólidos suspendidos en sus tres formas, pH, alcalinidad y relación de alcalinidades.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 5-9 se presenta el comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el sobrenadante durante la etapa de operación: Se observa que hay una importante reducción con respecto a la concentración en el influente alimentado. Sin embargo, la concentración encontrada dista de ser la de un efluente con la calidad esperada (menor a 0.5 g/L) ya que trae aún consigo una importante cantidad de sólidos. Esto se atribuye al arrastre de sólidos en suspensión que no se retuvieron en la cama de lodos y también al aporte de las natas que se formaban en la parte superior del digestor. La concentración promedio de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) durante la operación fue de 2.41 g/L. Es notoria la evacuación puntual de sólidos suspendidos en ciertos tiempos de la operación, provocada por el arrastre de las natas acumuladas en la superficie del reactor

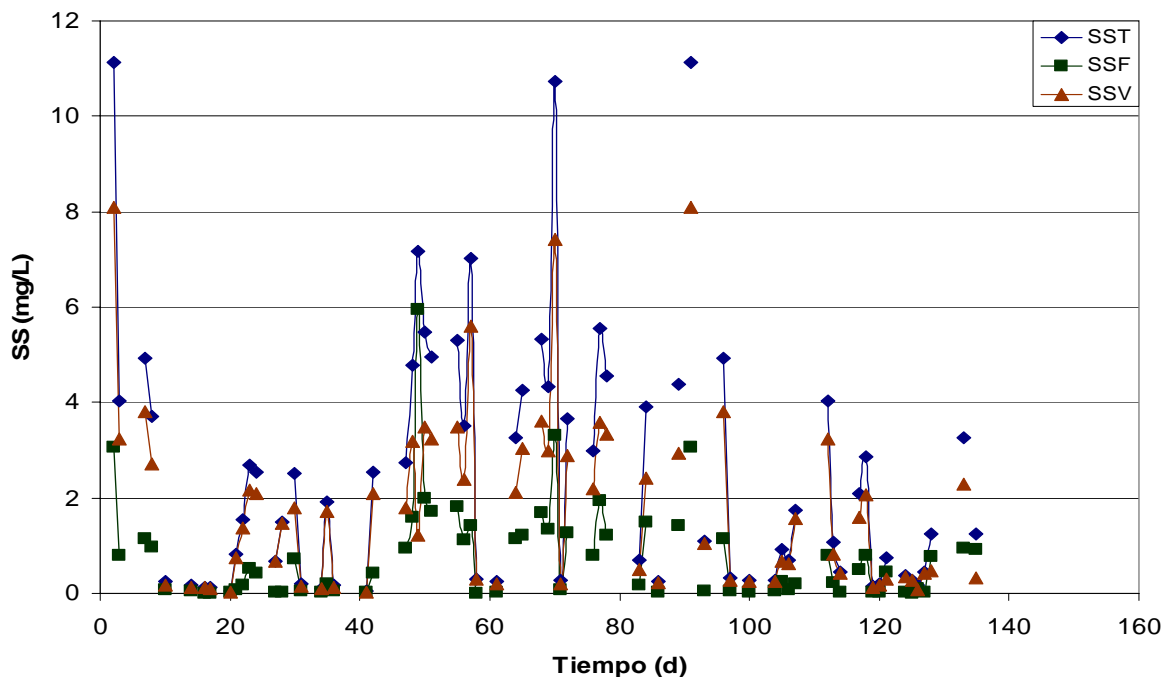


Figura 5-9. Sólidos suspendidos en sobrenadante.

La fracción volátil de sólidos suspendidos en el sobrenadante se registró por arriba del 60% durante casi la totalidad del tiempo de la experimentación. Esto se puede observar en la gráfica de la Figura 5-10. El promedio de la fracción volátil de los sólidos suspendidos fue del 75 %. En algunos días como el 28 se registraron valores por arriba del 95%. Esta alta fracción volátil indica que los sólidos suspendidos evacuados en el sobrenadante no estaban aún suficientemente digeridos.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

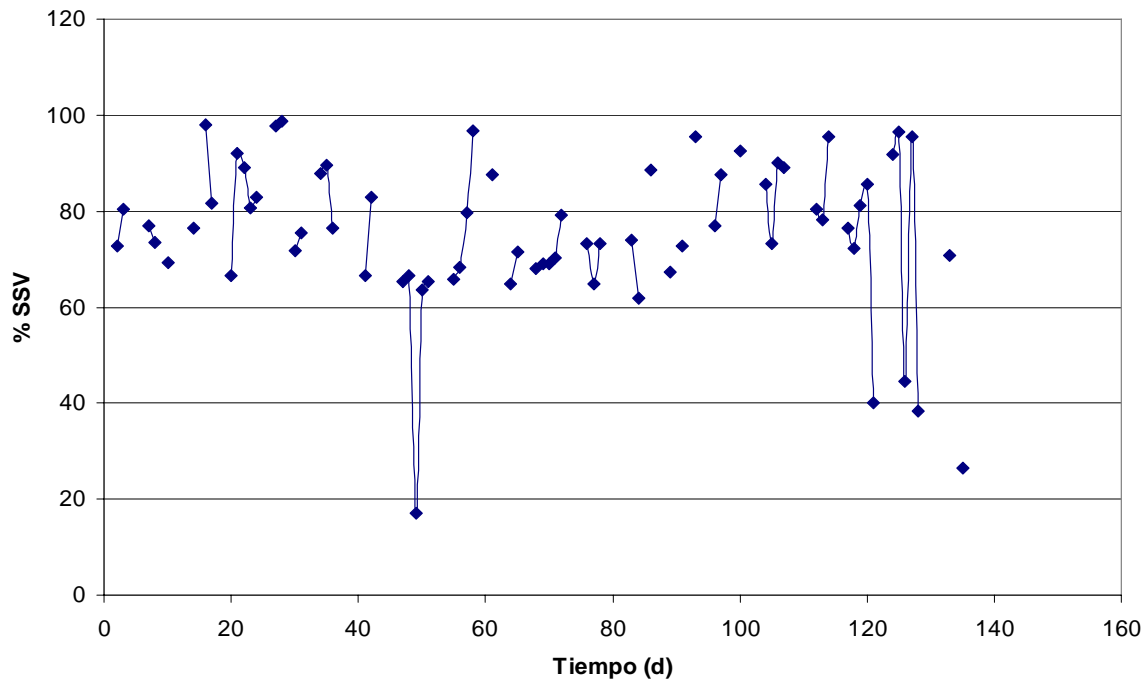


Figura 5-10. Porcentaje de sólidos suspendidos volátiles en sobrenadante.

5.2.1 Relación de alcalinidades y pH

La relación de alcalinidades alfa registró un valor promedio de 0.73 durante la experimentación, como se presenta en la Figura 5-11. Cabe mencionar que los valores mostrados para este parámetro se encuentran dentro del rango establecido para que el proceso de digestión anaerobia se lleve en forma adecuada. Este valor es una indicación de la estabilidad en el proceso. Por otra parte, en la misma figura se aprecia que la alcalinidad se va incrementando conforme la operación del digestor, alcanzando como valor promedio 665.45 mg CaCO₃/L, lo que resulta beneficioso al proceso ya que aporta mayor capacidad buffer.

El pH en el sobrenadante como se muestra en la Figura 5-12, presenta algunos cambios que lo mantienen en el rango de 6.6 a 7.9, obteniendo como valor promedio 7.34. Este comportamiento del pH es indicativo de que existe una buena estabilidad en el proceso de digestión.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

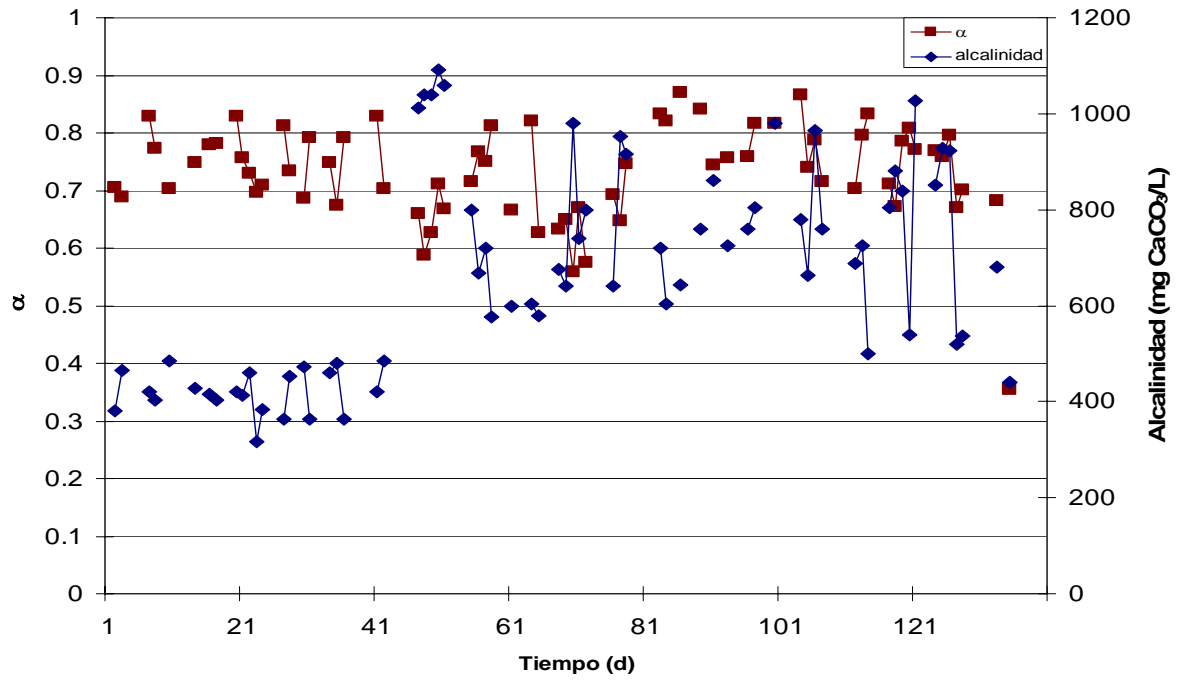


Figura 5-11. Relación alfa y alcalinidad en sobrenadante.

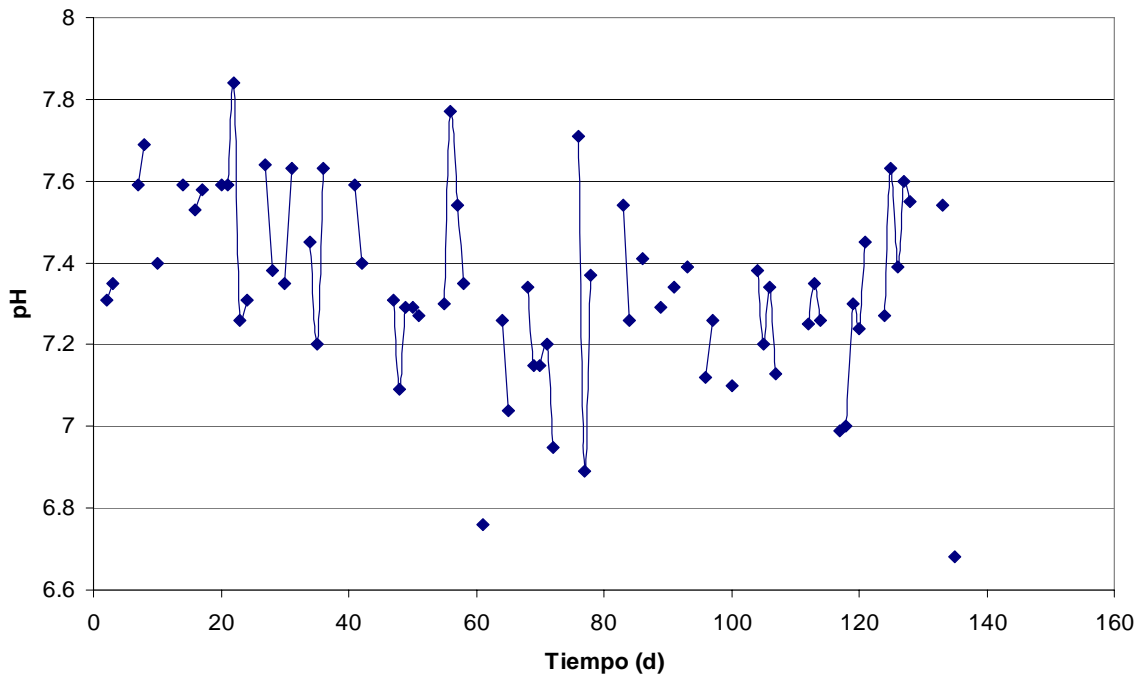


Figura 5-12. Evolución del pH del sobrenadante.

5.3 Lodos contenidos en el digestor

Las características del lodo contenido en el digestor tienen una importancia relevante en su funcionamiento y además es el lodo que será retirado del digestor a disposición final, porque contiene a la biomasa que se encarga de degradar la materia orgánica. Esta biomasa se encuentra compactada en forma de lodo floculento/granular formando un lecho de lodos en el fondo del digestor. El lecho funciona como filtro de las partículas que forman los lodos primario y secundario suministrados al digestor. Las características del lecho de lodo que se analizaron permiten evaluar el desempeño del digestor anaerobio; entre estos se tiene de los sólidos suspendidos, IVL, velocidad de sedimentación.

5.3.1 Sólidos suspendidos

En la Figura 5-13 se muestra la concentración de sólidos suspendidos en la cama de lodo del digestor. Se observa un aumento en la concentración de los sólidos suspendidos con el tiempo, lo que significa que el digestor está logrando el espesamiento del lodo retenido y en digestión. Se observa que la concentración de sólidos suspendidos totales en el lecho de lodos al principio de la experimentación fue de 13.42 g/L mientras que para los sólidos suspendidos volátiles fue de 8.34 g/L, (ambos valores del día 17). Al transcurrir el tiempo de la experimentación se presentó un incremento hasta llegar a valores promedio de SST de 21.94 g/L y de 13.61 g/L de SSV respectivamente, en el periodo de operación.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

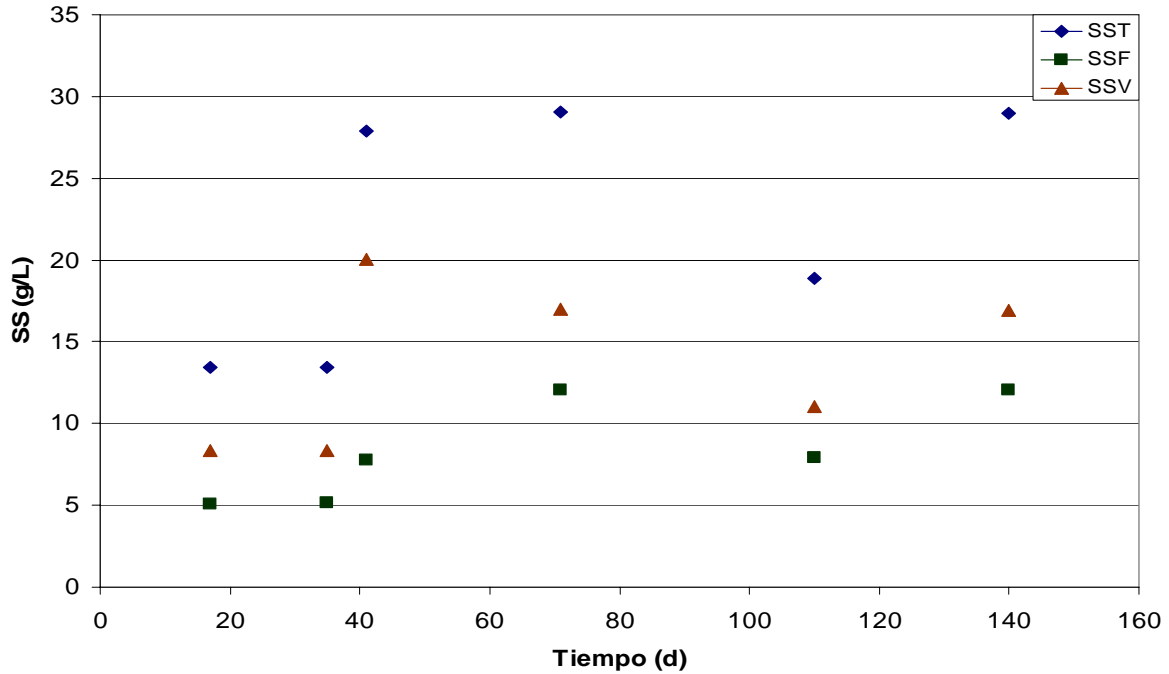


Figura 5-13. Sólidos suspendidos en cama de lodos del digestor

Por otra parte, en la Figura 5-14 se presenta la evolución de la fracción volátil de los lodos contenidos en el digestor. En ella se puede apreciar una reducción limitada pero constante con respecto al tiempo, que llega hasta valores por abajo del 60 % y en promedio de 62 %, lo cual indica que el proceso de digestión anaerobia no se está dando en forma satisfactoria ya que para que esto suceda la fracción volátil deberá ser menor al 55 %.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

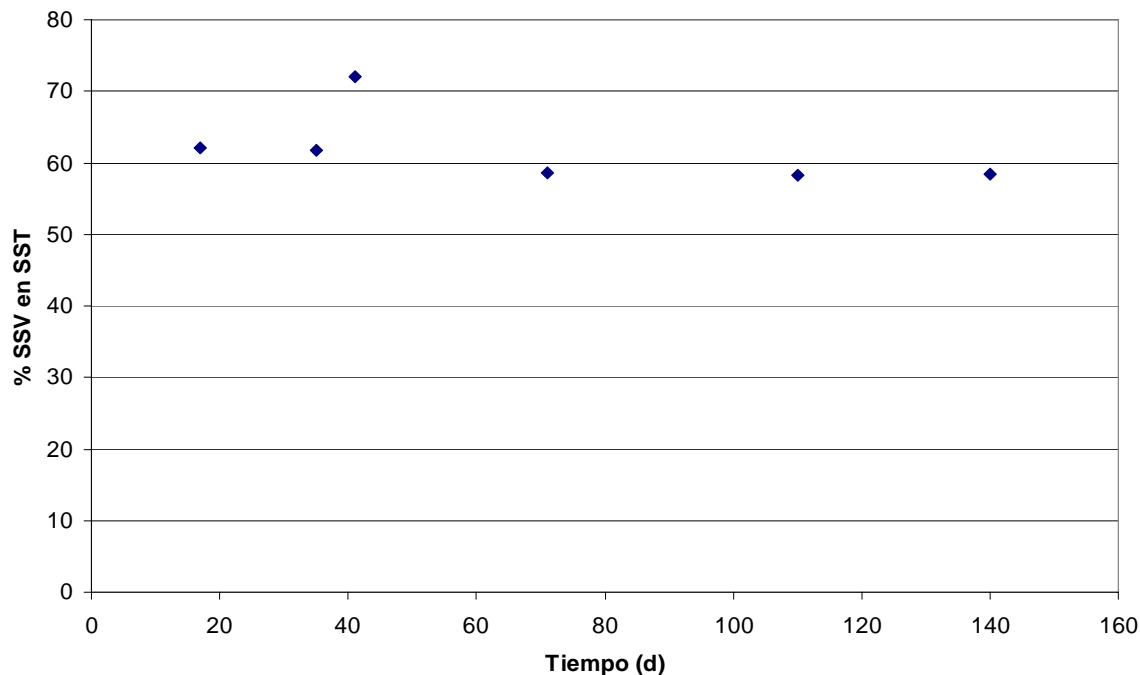


Figura 5-14. Fracción volátil en el lodo del digestor

5.3.2 Altura de la cama y temperatura

En la Figura 5-15 se puede observar la evolución de la altura de la cama de lodo. El valor inicial al principio de la operación fue de 2.3 m, aunque se registró una altura de 2.7 m (misma altura que la de las canaletas, ver Figura 4-2) al final, debida posiblemente a la contribución que hace la nata presente en el espejo de agua del digestor.

La variación en la altura fue baja principalmente porque parte del material que conformaba el lecho de lodos pasaba a formar parte de la nata suspendida en el espejo de agua, que llegó a tener un grosor de aproximadamente 20 cm. Tomando en cuenta este dato y las dimensiones de reactor, se puede contabilizar un volumen de nata de 3.28 m³ que representa un importante porcentaje en relación con el volumen ocupado por el lecho de lodos del digestor (calculando: $3.28/18.39 \times 100 = 17.8\%$)

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

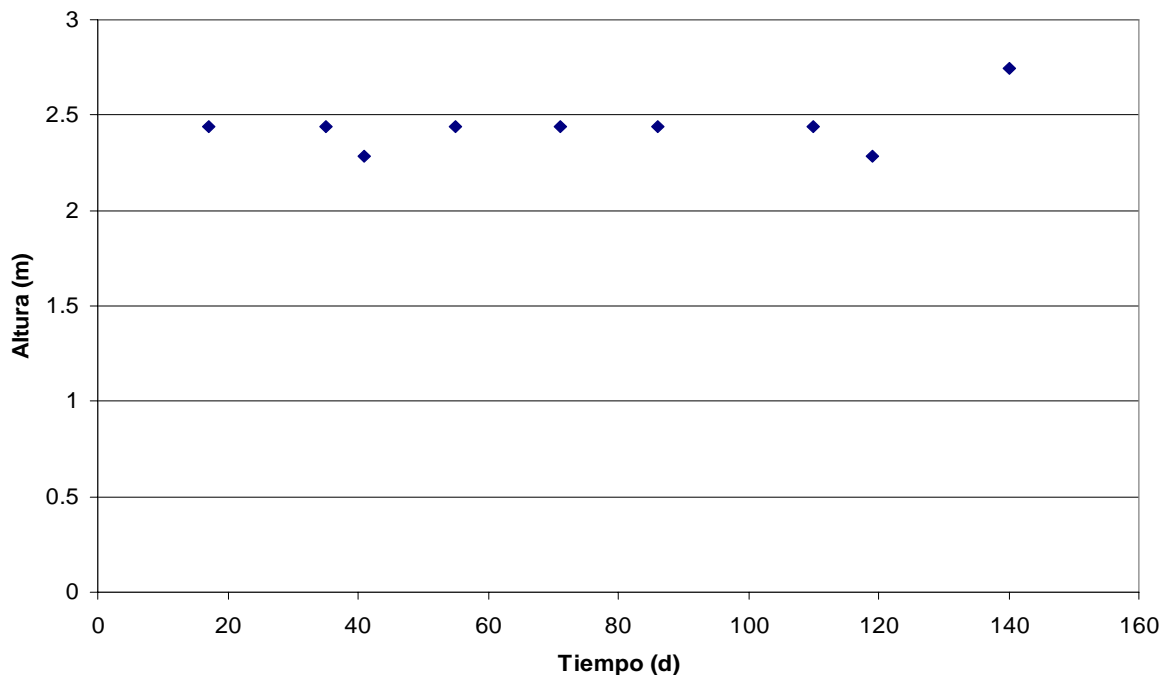


Figura 5-15. Altura de cama de lodos en el digestor.

En la Figura 5-16 se presenta el comportamiento de la temperatura del sobrenadante a través del tiempo. Para ello se utilizó un termómetro marca ERTCO (rango de temperatura: -5°C a 50°C). Se observan variaciones en la lectura registrada por el termómetro que van de los 19°C (día 58) a los 30°C (día 70). La temperatura promedio del sobrenadante fue de 26.7°C , y que se encuentra por debajo del rango mesofílico de operación de un digestor anaerobio de alta tasa que es de 33 a 38°C . La temperatura de la cama de lodos fue medida con un termopar que mantenía su lectura en 26°C sin cambios, lo que llevó a identificar una falla en su funcionamiento, razón por la que no se reporta la temperatura en ese punto.

El que los valores registrados se encontraran por abajo del rango mesofílico se debieron en parte a que se retiró la cubierta plástica del reactor que, además de retener el biogás generado, servía también de aislante térmico. Posteriormente el aislante térmico flotante improvisado (polietileno de baja densidad marca POLIFOM-PROMEGSA) evitaron una mayor caída de temperatura.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

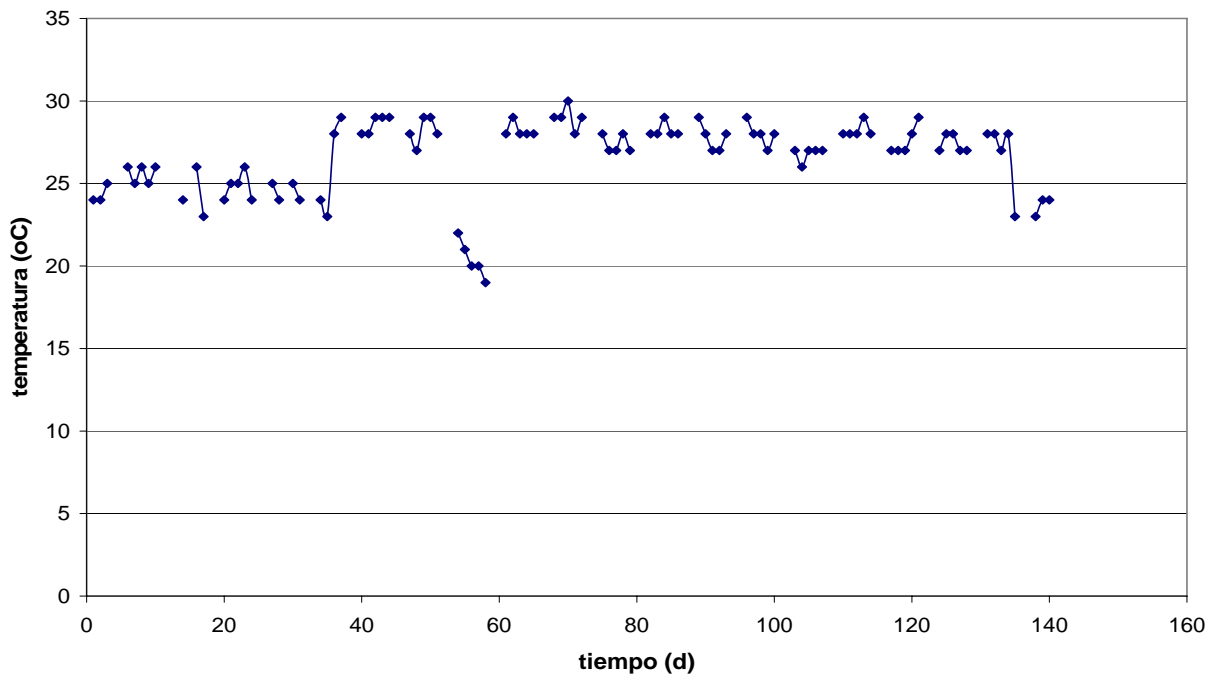


Figura 5-16. Evolución de la temperatura del sobrenadante.

5.3.3 Índice Volumétrico y Velocidad de Sedimentación

En la Figura 5-17 se puede observar el índice volumétrico de lodos (IVL) y la velocidad de sedimentación durante la etapa de experimentación. Se observa que al inicio se tiene un valor de IVL de 84.55 mL/g SST (día 35) y al final de la operación 64.55 mL/g SST lo que indica un incremento de la capacidad de compactación de los lodos. A pesar de este aumento, el IVL se mantuvo fuera del intervalo recomendado en la literatura para un lodo granular, que es de 20 a 40 mL/g (Noyola, 1994).

En lo que se refiere a la velocidad de sedimentación, se observa una disminución de ésta con el tiempo. En los primeros días de la experimentación se alcanzó una velocidad de sedimentación de 2.23 m/h, mientras que en la etapa final se registró una velocidad de 0.98 m/h.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

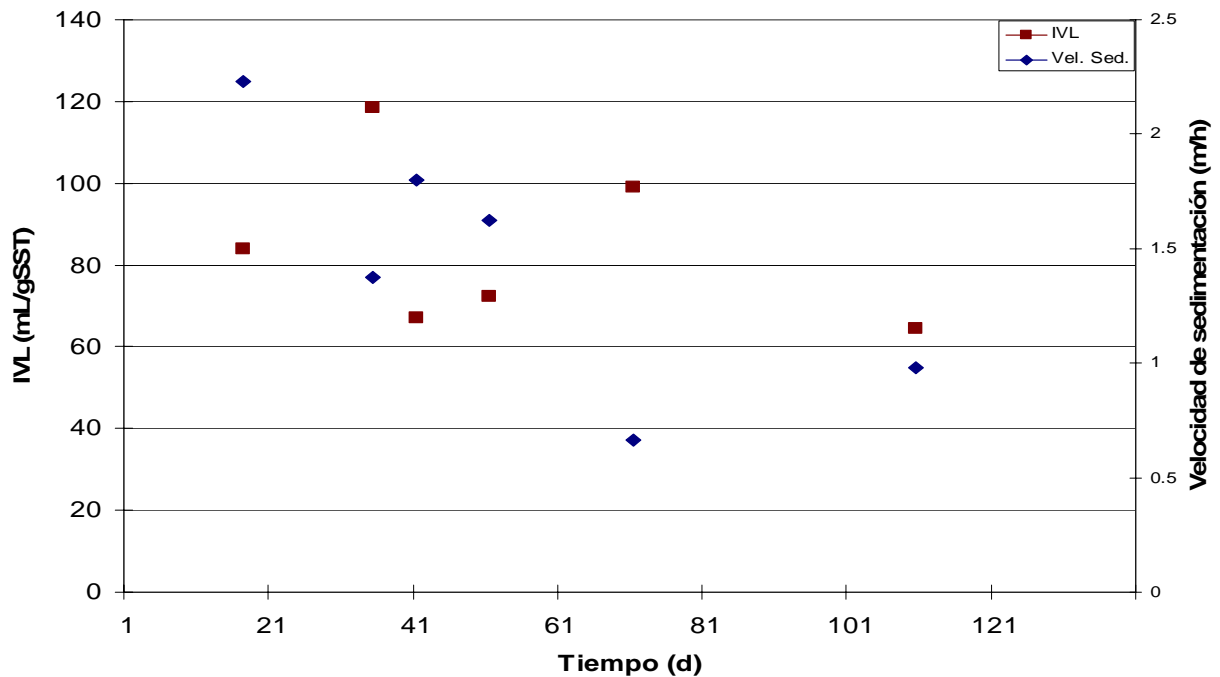


Figura 5-17. Índice volumétrico de lodos y velocidad de sedimentación en el digestor.

5.4 Espumas y natas

En el trabajo de Barrios (2007) se observó la formación de una capa de nata formada en la superficie del espejo de agua del digestor. Como consecuencia, durante este trabajo se retiró la lona de PVC que sirve de cubierta del digestor UASB para poder observar y dar seguimiento a la formación y crecimiento de la capa de nata. A continuación se presentan los resultados de esta observación.

Esta capa de nata presentaba un grosor aproximado de 20 centímetros con una superficie uniforme, de color gris oscuro, aparente homogeneidad y consistencia más frágil al tacto en función del contenido de humedad (ver Figura 5-18 y Figura 5-19).

Cuando era golpeada tendía a volcar y flotar mostrando la vista de corte transversal del fragmento formado y presentaba cierta dificultad para precipitarse. La concentración promedio de sólidos fue la siguiente: sólidos totales 16.59 g/L, sólidos totales fijos 6.59 g/L y sólidos totales volátiles 10 g/L.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES



Figura 5-18. Apariencia de la nata sobre el espejo de agua del digester UASB después de retirar la lona



Figura 5-19. Apariencia de la nata sobre el espejo de agua del digester UASB después de retirar la lona

Una vez descubierto el digester, se procedió a retirar la nata de manera manual (balde), evitando el uso de bombeo y con ello impedir la extracción de lodo granular de la cama. Una vez retirada la nata y con el espejo de agua descubierto (Figura 5-20), se procedió a alimentar al digester con la bomba centrífuga instalada para tal fin. Minutos después de comenzada la alimentación del lote diario se observaba el inicio de la formación y acumulación de burbujas sobre cada uno de los puntos donde se localiza la alimentación (Figura 5-21).



Figura 5-20. Apariencia de espejo de agua del digester UASB antes de comenzar la alimentación diaria



Figura 5-21. Apariencia de espejo de agua del digester UASB después de comenzar la alimentación. Se observa la formación de nata diferenciada sobre los puntos de alimentación

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Después de algunos minutos de comenzado esta formación de burbujas el espejo de agua se cubría completamente con una capa de espuma, precursora de la nata.. Probablemente esto se deba a un fenómeno de proceso de transporte hidráulico provocado por el flujo de la alimentación puntual (una vez al día) que pudo ocasionar un cortocircuito en la corriente de alimentación. De esta forma, el lodo crudo sería dirigido inmediatamente a la superficie del reactor, provocando además zonas muertas en algunas regiones de la cama de lodo. Esto favorecería la formación de la nata suspendida en el espejo de agua y la evacuación de lodos sin digerir. Por lo anteriormente observado se decidió suspender la alimentación de lodo primario y secundario para solo observar el crecimiento de la nata inducida por la recirculación (día 7 de observación de natas).

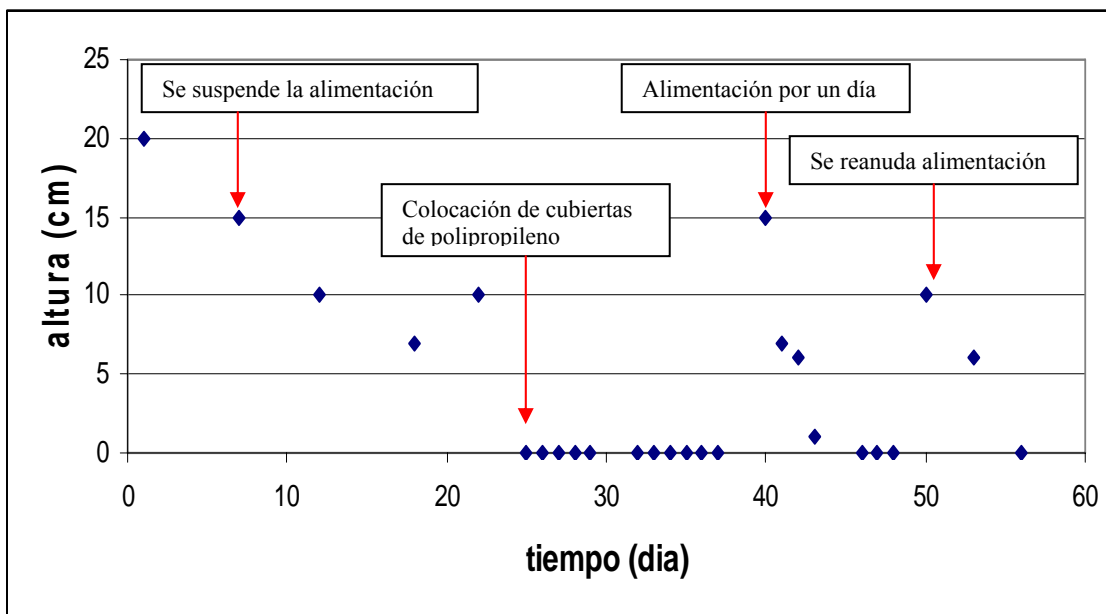


Figura 5-22. Evolución del grosor de la nata durante el periodo de observación sin alimentación y solo con recirculación. La nata era destruída cada 24 horas.

En la Figura 5-22 se puede observar el comportamiento del grosor de la nata a lo largo del tiempo de observación, registrado al inicio de actividades de cada día. Cada día de manera rutinaria, se hacía precipitar la nata hacia el fondo del digestor, por lo tanto cada una de las lecturas representa el grosor de la nata después de que transcurrieron aproximadamente 24 horas después de su precipitación hacia el fondo. Se observa en esta grafica un primer

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

grupo de puntos con valores que van de los 20 cm (valor inicial de las mediciones) a los 5 cm.



Figura 5-23. Apariencia de la nata formada 8 horas después de que fue precipitada



Figura 5-24. Apariencia de la nata formada 24 horas después de que fue precipitada

Después, es posible ver otro conjunto de puntos con valores igual a cero. El primer conjunto de puntos que muestran claramente la formación de natas (ver Figura 5-23 y Figura 5-24) corresponden a los días en los que se siguió con la operación de alimentación normal durante 7 días y el comienzo de la recirculación durante el resto del periodo de observación. El segundo conjunto de puntos, donde se comienzan a registrar lecturas de nula formación de nata (Figura 5-25 y Figura 5-26), inicia con la colocación de las hojas de polipropileno como cubierta del espejo de agua. Es clara la diferencia de los resultados de observación entre un periodo y otro, por lo que es posible que las hojas de polipropileno hayan servido como barreras que impedían la acumulación de flotantes y que estos estuvieran en contacto con el aire, lo que evitaba el secado de superficie. Además, el paro de la alimentación contribuyó a que la formación de nata se haya visto reducida al disminuir la aportación de materia en suspensión.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

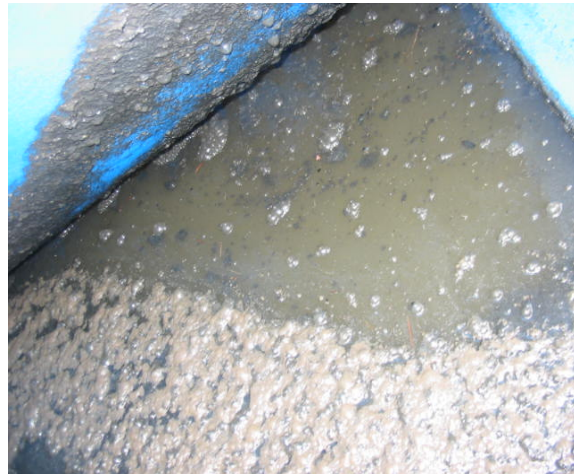


Figura 5-25. Apariencia del espejo de agua con nula formación de nata después de haber colocado las hojas de polipropileno

Figura 5-26. Apariencia del espejo de agua con nula formación de nata después de haber colocado las hojas de polipropileno

Existe un tercer grupo de puntos (día 40 del periodo de observación) en los que se puede observar nueva formación de nata. En este periodo fue necesario alimentar al digestor en algunas ocasiones para recuperar el nivel de agua debido que se presentaron problemas de fugas del sobrenadante, ocasionados por el mal funcionamiento de una válvula check que tiene como función impedir el retorno de la recirculación y por una fisura del digestor, aun sin localizar. Por los resultados anteriormente mostrados es posible pensar en la existencia de una relación directa entre la formación de nata y la operación de alimentación. Al final de esta experimentación se decidió hacer un cambio en el régimen de alimentación pasando de alimentación por lotes a semicontinua, siendo necesaria la sustitución de una bomba centrífuga por una bomba peristáltica que permitió la alimentación al digestor de los 8 m³ del influente en periodos de 15 minutos cada hora durante las 24 horas del día con un gasto de 18 litros por minuto. La Figura 5-25 muestra el efecto de cortocircuito hidráulico que se presentaba con la alimentación por lotes: al centro, se observa un promontorio de lodo formado por la corriente de alimentación que favorece el transporte del lodo crudo alimentado directamente a la superficie.

Una vez iniciada la alimentación, en la Figura 5-26, se observa la formación de natas a pesar de contar con la cubierta de poliuretano. Este resultado no es congruente con el obtenido durante la etapa sin alimentación, lo que indicaría que ese comportamiento favorable fue debido fundamentalmente a la ausencia de alimentación en ese periodo.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES



Figura 5-27. Comienzo de la formación de nata sobre uno de los puntos de alimentación del digestor



Figura 5-28. Formación de nata 24 horas después de que se alimentó al digestor

Como ya ha sido comentado, durante el periodo de observación de la nata de manera diaria se precipitaba al fondo del digestor. Se utilizaron principalmente 2 medidas para provocar la precipitación: una fue por medio de la aplicación de chorros de agua sobre la superficie de la nata, y la segunda fue la agitación con un dispositivo de limpieza domestica (comúnmente conocido como jalador). Los resultados observados permiten concluir que la nata presenta dificultades para su precipitación, ya sea por el grosor, hasta de 20 cm, ó porque durante la agitación su consistencia se tornaba viscosa y con poca tendencia a precipitarse (Figura 5-27 y Figura 5-28). Aunado a lo anteriormente comentado, se puede señalar que una vez que se terminaba con la operación de precipitación inmediatamente comenzaba la formación de nata nuevamente. Los resultados de la cuantificación del grosor mostrados en la Figura 5-22 podrían sugerir que la cubierta de polipropileno constituye un método eficaz para la prevención y el control de la formación de natas. Sin embargo, como ya se mencionó, una vez que se alimenta nuevamente se observa la formación de nata, a pesar de contar con una cubierta.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES



Figura 5-29. Apariencia de la nata después de haberse agitado



Figura 5-30. Apariencia de la nata después de haberse agitado

5.5 Balance de masa

Es importante plantear un balance de masa de sólidos suspendidos volátiles en el digestor con el objetivo de conocer teóricamente su eficiencia en la degradación de esta fracción del lodo, y por ende el grado de su estabilización. Para lo anterior se plantea una ecuación de balance de masa de acuerdo al siguiente diagrama:

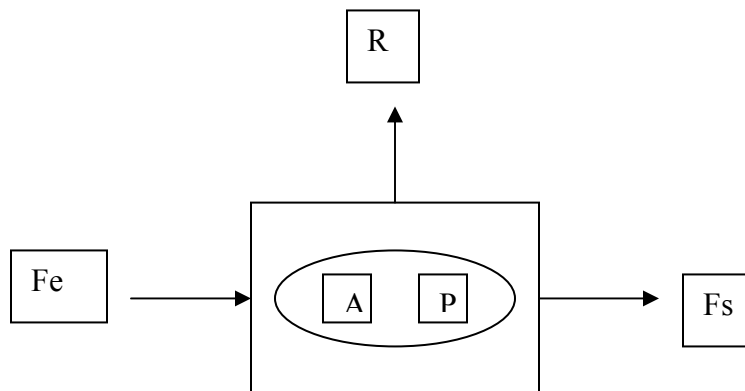


Figura 5-31. Diagrama general de balance de masa

Donde:

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

F_e : flujo másico entrante que cruza la frontera del sistema

F_s : Flujo másico saliente que cruza la frontera del sistema

R: Remoción total del sistema

A: Acumulación dentro del sistema

P: Producción dentro del sistema

Ecuación de balance de masa general:

$$F_e = F_s + R + A - P$$

5.4.1 Balance de masa y reducción de sólidos suspendidos volátiles con base en el balance de masa

Para mostrar las variables que intervienen en el proceso dentro del digester anaerobio se hace el siguiente esquema:

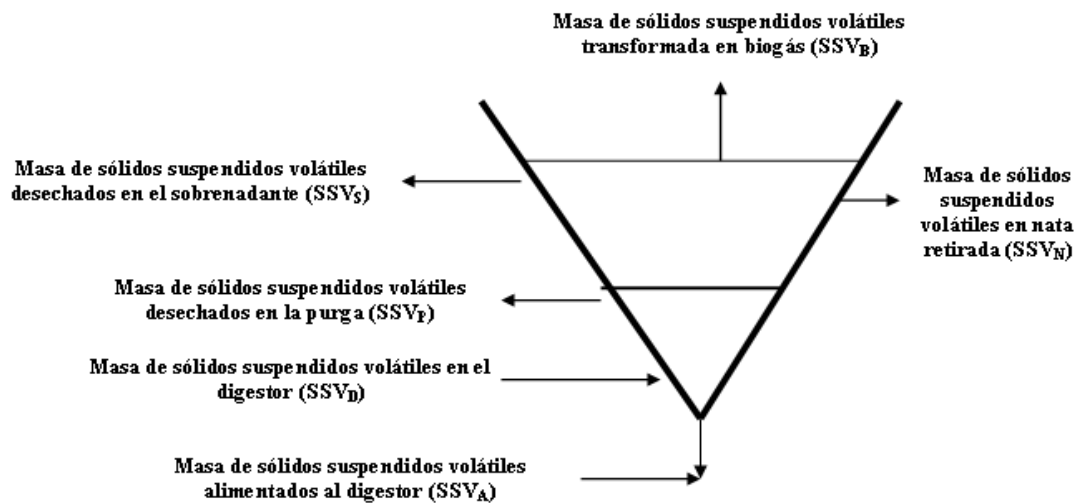


Figura 5-32. Diagrama de balance de masa de SSV en el digester

Haciendo una comparación entre la ecuación de balance de masa con la de las variables que intervienen en el digester se tiene:

$$SSV_A = SSV_S + SSV_P + SSV_B + SSV_D + SSV_N$$

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se puede hacer la siguiente consideración: $SSV_D = SSV_{Df} - SSV_{Di}$

Donde

SSV_{Df} : sólidos suspendidos volátiles en el digestor en el tiempo final de la experimentación

SSV_{Di} : sólidos suspendidos volátiles en el digestor en el tiempo inicial de la experimentación

Por lo que la ecuación de balance de masa en el digestor queda de la siguiente forma:

$$SSV_A = SSV_S + SSV_P + SSV_B + SSV_{Df} - SSV_{Di} + SSV_N$$

Tomando en cuenta el balance de masa que se muestra en el anexo I se presentan los siguientes resultados:

$$SSV_A = 2616.38 \text{ kg SSV}$$

$$SSV_S = 749.33 \text{ kg SSV}$$

$$SSV_N = 30.23 \text{ kg SSV}$$

$$SSV_P = 0 \text{ kg SSV (no se efectuó purga)}$$

$$SSV_B = ??? \text{ kg SSV (no se determinó la producción de biogás ni su composición)}$$

$$SSV_{Df} = 292.04 \text{ kg SSV}$$

$$SSV_{Di} = 113.80 \text{ kg SSV}$$

Despejando de la ecuación de balance de masa el término SSV_B se tiene que:

$$SSV_B = SSV_A - SSV_S - SSV_N - SSV_P - SSV_{Df} + SSV_{Di}$$

$$SSV_B = 2616.38 - 749.33 - 30.23 - 292.04 + 113.80$$

$$SSV_B = 1658.62 \text{ kg}$$

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El cálculo anterior indica que se eliminaron 1658.62 kg de sólidos suspendidos volátiles en forma de biogás durante la operación del digestor. Si el 100 % de sólidos suspendidos volátiles es la cantidad total entrante (2616.38 kg) entonces el porcentaje que representa la cantidad de sólidos suspendidos volátiles eliminados es el 64.55 %. Como este valor es calculado no se discriminan errores. No fue posible medir la cantidad de biogás generado debido a que se retiró la lona que cubría al digestor para darle seguimiento al crecimiento de las natas.

Como se mencionó anteriormente la variación en la altura de la cama de lodo en el digestor fue casi nula debido principalmente al alto contenido de sólidos en el sobrenadante (promedio de sólidos suspendidos totales de 2.41 g/L) y a la cantidad de sólidos que eran arrastrados con la nata que aparecía diariamente después de que el día anterior había sido precipitada al fondo del digestor. Esta altura constante llevó a tomar la decisión de no proceder a su purga.

5.6. Porcentaje de reducción de sólidos suspendidos con base en las concentraciones promedio

Debido a que no fue posible purgar el digestor es necesario tomar los valores obtenidos en la experimentación de sólidos suspendidos volátiles para dar una aproximación de la eficiencia de remoción de SSV. El cálculo es hecho de acuerdo con Metcalf & Eddy (2003).

El porcentaje promedio de SSV durante la última determinación del lodo del digestor fue del 58.39 % mientras que el porcentaje promedio de la última semana de operación para el influente fue del 69.5%. Tomando en cuenta estos datos se hace el siguiente planteamiento:

Fuente	% sólidos suspendidos fijos	% sólidos suspendidos volátiles
Influente	30.5 %	69.5 %
Cama de lodos	41.61 %	58.39 %

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Asumiendo como base un lote de 100 kg de SST en el influente

$$\text{SSF en el influente} = \frac{0.305}{0.305 + 0.695} (100\text{kg}) = 30.5\text{kg}$$

Ya que la masa de SST se considera constante se puede asumir que:

$$\text{SST en la cama de lodos} = \frac{0.305}{0.4161} (100\text{kg}) = 73.3\text{KgSST}$$

Si la masa de SSV en los lodos digeridos es X entonces:

$$\text{SSF en la cama de lodos (lodos digeridos)} = 41.61 \% = \frac{0.305}{0.305 + X}$$

$$X = 42.8 \text{ kg SSV}$$

Y la masa de lodo digerido será 42.8 kg SSV + 30.5 kg SSF = 73.3 kg SST

Por lo tanto:

$$\text{Porcentaje de reducción de SST} = \frac{100\text{kg} - 73.3\text{kg}}{100\text{kg}} \times 100 = 26.7 \%$$

$$\text{Porcentaje de reducción de SSV} = \frac{69.5\text{kg} - 42.8\text{kg}}{69.5\text{kg}} \times 100 = 38.42\%$$

Tomando como base la literatura, se reporta que para los digestores anaerobios de alta tasa eficiencias de remoción de SSV del 45 al 50% (Metcalf y Eddy, 2003) y la reducción en la masa total de SST del 25 al 45% (Noyola, 1998), por lo que de acuerdo a lo obtenido en el cálculo desarrollado, se asume que la reducción de los SST cae dentro del intervalo mencionado, mientras que para los SSV se encuentra por abajo. Lo anterior confirma que el lodo obtenido producto de la digestión está aún parcialmente digerido.

5.7 Análisis técnico-económico del digestor tipo UASB y comparado con otra tecnología

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

La evaluación económica es una herramienta fundamental para la toma de decisiones al momento de escoger entre dos tecnologías de diferentes características y que buscan resolver un problema.

Al hacer una evaluación económica se busca obtener información necesaria para la toma de decisiones. El principio de este objetivo es proporcionar criterios simples que permitan estimar la viabilidad económica del proyecto.

Pérez (2004) en un estudio anterior llevó a cabo una estimación de costos por medio de los índices reportados en revistas de carácter técnico, escalando el digester no convencional UASB, y otro convencional, para una cantidad de lodos de 267 m³/día con una concentración de sólidos suspendidos totales de 40 kg/m³, que resulta en un flujo másico de 10680 kg SST/día. La estimación de costos arrojó los siguientes resultados:

Tabla 5-1. Resultados de la evaluación económica entre el proceso convencional y el proceso no convencional (Pérez, 2004).

Concepto	Digester convencional diseñado bajo una carga de 2.5 kgSSV/m³ d	Digester no convencional (UASB) diseñado bajo una carga de 2.5 kgSSV/m³ d
Construcción (directos e indirectos) Costo (USD)	877898	823430
Equipo Costo (USD)	406811	374968
Operación Costo (USD)	125458	114941
Total Costo (USD)	1410167	1313339

El paso siguiente que llevó a cabo Pérez (2004) fue elaborar una matriz comparativa después de aspectos técnicos que evaluó y ponderó cada aspecto técnico y económico. En

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

la matriz, que a continuación se presenta, el peso designado al aspecto técnico fue del 50 % mientras que para el económico se le asignó el mismo porcentaje.

Tabla 5-2. Matriz comparativa. Proceso convencional y proceso no convencional (Pérez, 2004).

	Factor a evaluar	Valor del aspecto a evaluar	Digestor convencional	Digestor no convencional
	EVALUACION TECNICA	0.50		
1	<i>Calidad de efluente</i>	<i>0.083</i>	0.042	0.042
1.1	Calidad del efluente	0.083	0.50	0.50
2	<i>Características relevantes</i>	<i>0.083</i>	0.078	0.066
2.1	Vida útil	0.012	1.00	0.50
2.2	Capacidad	0.012	1.00	1.00
2.3	Existencia en el mercado	0.012	1.00	0.50
2.4	Requerimientos de área	0.012	1.00	0.5
2.5	Obsolescencia	0.012	1.00	1.00
2.6	Condiciones normales de operación	0.012	0.50	1.00
2.7	Requerimientos de energía	0.012	1.00	1.00
3	<i>Flexibilidad del proceso</i>	<i>0.083</i>	0.07	0.083
3.1	Complejidad	0.028	0.50	1.00
3.2	Confiabilidad	0.028	1.00	1.00
3.3	Automatización	0.028	1.00	1.00
4	<i>Servicios auxiliares</i>	<i>0.083</i>	0.083	0.083
4.1	Servicios auxiliares	0.083	1.00	1.00
5	<i>Mano de obra requerida</i>	<i>0.083</i>	0.083	0.083
5.1	Mano de obra requerida	0.083	1.00	1.00
6	<i>Seguridad</i>	<i>0.083</i>	0.042	0.042
6.1	Seguridad	0.083	0.50	0.50
	EVALUACION ECONOMICA	0.50		
1	Aspectos económicos	0.50	0.25	0.50
1.1	Costos de inversión	0.25	0.50	1.00
1.2	Costos de operación	0.25	0.50	1.00
	TOTAL	1.00	0.64	0.90

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se muestra en la Tabla 5-2, se le asignó a cada aspecto un valor evaluándose bajo tres posibles calificaciones: 1.0, 0.5 y 0 que corresponden a muy favorable, favorable y desfavorable respectivamente. Por último se sumaron todas las calificaciones obteniendo los resultados que se muestran en la matriz comparativa de la Tabla 5-2.

Una de las diferencias fundamentales es la inexistencia de tecnología aplicada de tipo UASB para el tratamiento de lodos de desecho de plantas de tratamiento de agua residual municipal. Otro aspecto importante a tomar en cuenta es que, a pesar de no tener la necesidad de un espesador de lodos en la tecnología tipo UASB, es necesaria mayor área en comparación con la tecnología convencional. Pérez (2004), en el trabajo previo sobre evaluación de requerimiento de área para dos digestores, uno convencional y otro diseñado bajo la tecnología UASB para una misma carga másica ($2.5 \text{ kg SSV/m}^3\text{día}$), encontró que se requieren 1200 m^2 contra 1500 m^2 de área respectivamente.

Una vez hecha la suma de las calificaciones de cada aspecto para las diferentes tecnologías mostrada en la matriz comparativa de la Tabla 5-2, Pérez (2004) concluye que el tratamiento de lodos por medio de la digestión no convencional es el más favorable al obtener una suma 0.90 contra un 0.64 para la tecnología convencional.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de la operación del digestor no convencional tipo UASB, se derivan las siguientes conclusiones:

El proceso de digestión de los lodos se llevó a cabo de manera limitada, ya que la relación entre SSV y SST en la cama de lodos al final del experimento fue del 58%. Así mismo, el balance de masa efectuado permitió calcular que los SSV fueron degradados en un 38%. Estos dos valores permiten establecer que solo se alcanzó una estabilización parcial de la materia orgánica contenida en los lodos alimentados.

El sobrenadante presentó una importante reducción de sólidos con respecto a la concentración en el influente alimentado. Sin embargo, dista de ser un efluente con la calidad esperada (menor a 0.5 g/L) ya que trae aún consigo una importante cantidad de sólidos. Esto se atribuye al arrastre de sólidos en suspensión que no se alcanzan a retener en la cama de lodos así como al aporte por arrastre de las natas.

Del comportamiento del digestor UASB, se puede asumir que la configuración de este sistema favorece la sedimentación así como la compactación de los lodos alimentados, y que cumple satisfactoriamente con la función de espesador de lodos.

La formación de la nata se debe en parte a un fenómeno de transporte hidráulico en el flujo de la alimentación que provoca el arrastre de partículas de la cama de lodo y de lodo crudo, hacia el espejo de agua, además de producir zonas muertas que provocan una deficiente digestión del lodo. Se observó que la colocación de hojas de polipropileno de baja densidad produjo un efecto de reducción sobre el crecimiento de la nata, al menos durante el periodo sin alimentación del digestor. Sin embargo, una vez que se alimentó el digestor apareció nuevamente la nata, a pesar de encontrarse las hojas de polipropileno.

6.2 Recomendaciones

El problema de la aparición de natas y espuma en el espejo de agua del digestor deberá ser estudiado con mayor profundidad ya que está asociado a pérdida de eficiencia y problemas en la operación de los digestores. Para ello se recomienda lo siguiente:

Es necesario caracterizar la composición de las natas que se forman en el espejo de agua del digestor, poniendo especial atención a la determinación de sólidos con el objeto de establecer una relación entre la cantidad de sólidos alimentados y atrapados en la nata.

Es importante continuar la experimentación estudiando las variables que influyen en el fenómeno de formación de las espumas y natas para mejorar la operación del digestor y por ende la eficiencia del digestor anaerobio. Entre las variables a evaluar están, la temperatura, el régimen de flujo, la velocidad ascensional, entre otros.

Se deben contemplar también otros tipos de dispositivos mecánicos simples y rentables que permitan la destrucción de la nata formada en el digestor tipo UASB.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Barrios, A. (2007) Digestión anaerobia de lodos residuales en un reactor tipo lecho de lodos. Tesis para obtener el título de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, D. F., México.

Barrios, A., Briones, R., Noyola, A. (2006). Digestión Anaerobia de lodos de desecho de planta de tratamiento mediante un reactor tipo UASB. Memorias del VIII Taller y Simposio Latinoamericano Sobre Digestión Anaerobia. Punta del este, Uruguay.

Cesar, E., Vazquez, A. (2001). Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales, 1ª Edición, Universidad Nacional Autónoma de México, D. F., México.

Comisión Nacional del Agua, (2004). Estudios estadísticos, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Inventario nacional de plantas potabilizadoras y de tratamiento. <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>

Environmental Protection Agency (EPA) (1999). Cost Estimation Report No. EPA/452

Gujer, W., Zehnder, J. (1993). Conversion processes in anaerobic digestion. Water Science Technology, 15:127-167.

Haandel, A., Kato, M., Cavalcanti, P., Florencio, L. (2006). Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 5:21-34.

Jenkins, S., Morgan, J., Sawyer, C. (1991). Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digester. Res. 1 WPCF, V. 63

Lettinga, G., Hulshoff, P. (1991). UASB-Process design for various types of wastewater. Water Science and Technology, 24(8):87-107.

Malina, J., Pohland, F. (1992). Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. Technomic Publication. USA.

Metcalf and Eddy (2003). Wastewater Engineering Treatment, disposal and reuse. 3rd Edition. McGraw-Hill. USA.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (2003), Protección ambiental.- Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Noyola, A. (1994). Diseño, inoculación y arranque de reactores UASB Tratamiento Anaerobio. Memorias del III Taller y Seminario Latinoamericano de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

BIBLIOGRAFÍA

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

Pérez, A., Mancebo, U., Ortega, L., Noyola, A. (2002). Digestión anaerobia no convencional de lodos biológicos utilizando un reactor tipo UASB, Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, FEMISCA, Guanajuato, México.

Perez, A. (2004). Escalamiento de un digester no convencional para lodos biológicos de purga, caso de estudio: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella. Tesis para obtener el título de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, D. F. México.

Qasim, S. (1994). Wasterwater treatment plants. 2nd Technomic Publication . USA.

Raman, P., Ranga V. (1989). A static scum-breaking net for fixed-dome biogas plants. Biological Wastes 30: 12.

BARBER, W.. (2005) Anaerobic digester foaming: causes and solutions. Water 21, 2:45-49

Vardar, F.(1998). Foaming: Consequences, prevention and destruction. Biotechnology Advances, 16:913-948

ANEXO

**RESULTADOS OBTENIDOS DE LA OPERACIÓN DEL DIGESTOR NO
CONVENCIONAL (UASB) PILOTO. PERIODO DE OPERACIÓN: AGOSTO
DE 2005 A FEBRERO DE 2006**

Sólidos suspendidos

Fecha	Primario (g/L)			Secundario (g/L)			Sobrenadante (g/L)			Lecho de lodo (g/L)		
	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV
1												
2				7.63	2.57	5.06	11.14	3.05	8.09			
3	15.54	7.31	8.23	10.52	4.19	6.33	4.03	0.79	3.24			
4												
5												
6												
7	19.02	8.88	10.14	3.27	0.43	2.84	4.94	1.14	3.8			
8	19.04	8.93	10.11	9.89	3.8	6.09	3.7	0.98	2.72			
9												
10	29.99	14.88	15.11	27.99	11.8	16.19	0.26	0.08	0.18			
11												
12												
13												
14	8.99	4.42	4.57	10.61	4.02	6.59	0.17	0.04	0.13			
15												
16	12.17	5.11	7.06	7.71	2.48	5.23	0.1225	0.0025	0.12			
17	12.16	5.1	7.04	7.73	2.5	5.3	0.1225	0.003	0.1	13.42	5.08	8.34
18												
19												
20	13.84	5.31	8.53	3.52	0.38	3.14	0.042	0.014	0.028			
21	4.95	1.65	3.3	4.58	0.58	4	0.81	0.065	0.745			
22	13.16	5.35	7.81	4.86	0.82	4.04	1.54	0.17	1.37			
23	15.38	6.67	8.71	4.11	0.57	3.54	2.69	0.52	2.17			
24	16.89	8.06	8.83	4.7	0.77	3.93	2.53	0.43	2.1			
25												
26												
27	4.88	1.68	3.2	4.63	0.56	4.07	0.675	0.015	0.66			
28	4.17	1.27	2.9	5.4	1.08	4.32	1.49	0.02	1.47			
29												
30	11.28	4.42	6.86	3.43	0.34	3.09	2.51	0.71	1.8			
31	5.46	1.96	3.5	4.64	0.68	3.96	0.203	0.05	0.153			
32												
33												
34	8.61	3.03	5.58	5.03	0.91	4.12	0.107	0.013	0.094			
35	6.71	2.49	4.22	4.63	0.58	4.05	1.91	0.2	1.71	13.46	5.14	8.32
36	8.99	4.42	4.57	10.61	4.02	6.59	0.17	0.04	0.13			
37												
38												
39												
40												

ANEXO RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

41	13.84	5.31	8.53	3.52	0.38	3.14	0.042	0.014	0.028	27.87	7.8	20.07
42	16.89	8.06	8.83	4.7	0.77	3.93	2.53	0.43	2.1			
43												
44												
45												
46												
47	5.6	2.2	3.4	3.13	0.55	2.58	2.74	0.95	1.79			
48	21.66	7.55	14.11	3.93	0.73	3.2	4.78	1.6	3.18			
49	21.27	1.23	20.04	3.44	0.82	2.62	7.18	5.96	1.22			
50	20.61	8	12.61	3.22	0.53	2.69	5.48	1.99	3.49			
51	6.5	2.48	4.02	3.76	0.64	3.12	4.96	1.72	3.24			
52												
53												
54												
55	19.95	2.58	17.37	3.61	0.58	3.03	5.31	1.82	3.49			
56	6.86	1.96	4.9	3.13	0.5	2.63	3.51	1.11	2.4			
57	5.86	1.6	4.26	4.66	0.72	3.94	7.02	1.42	5.6			
58	6.97	1.89	5.08	4.29	0.65	3.64	0.31	0.01	0.3			
59												
60												
61	6.17	1.71	4.46	4.29	0.64	3.65	0.24	0.03	0.21			
62												
63												
64	20.46	7.48	12.98	3.71	0.69	3.02	3.25	1.14	2.11			
65	5.62	1.52	4.1	6.05	1.05	5	4.25	1.21	3.04			
66												
67												
68	7.26	1.99	5.27	5.33	0.89	4.44	5.32	1.7	3.62			
69	10.21	3.24	6.97	5.29	0.81	4.48	4.32	1.34	2.98			
70	13.25	3.96	9.29	4.59	0.83	3.76	10.73	3.32	7.41			
71	6.37	1.81	4.56	4.98	0.77	4.21	0.27	0.08	0.19	29.06	12.04	17.02
72	4.93	1.36	3.57	4.31	0.7	3.61	3.66	1.27	2.9			
73												
74												
75												
76	13.25	3.96	9.29	5.33	1.74	3.59	3	0.8	2.2			
77	7.91	2.64	5.27	4.83	0.91	3.92	5.54	1.95	3.59			
78	11.61	3.77	7.84	5.97	1	4.97	4.55	1.22	3.33			
79												
80												
81												
82												
83	9.54	3.54	6	4.98	1.1	3.88	0.69	0.18	0.51			
84	13.7	5.18	8.52	3.45	0.68	2.77	3.91	1.49	2.42			
85												
86	7.81	2.84	4.97	4.2	0.63	3.57	0.26	0.03	0.23			
87												
88												
89	6.15	2.09	4.06	5.45	1.1	4.35	4.37	1.43	2.94			
90												
91	5.3	1.5	3.8	4.92	0.83	4.09	11.14	3.05	8.09			
92												
93	9.87	3.41	6.46	2.61	0.49	2.12	1.09	0.05	1.04			

ANEXO RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

94												
95												
96	13.01	4.75	8.26	3.27	0.43	2.84	4.94	1.14	3.8			
97	11.36	3.8	7.56	3.22	0.51	2.71	0.32	0.04	0.28			
98												
99												
100	17.28	6.05	11.23	2.83	0.44	2.39	0.27	0.02	0.25			
101												
102												
103												
104	17.38	5.8	11.58	7.63	2.57	5.06	0.28	0.04	0.24			
105	10.46	3.44	7.02	2.67	0.45	2.22	0.93	0.25	0.68			
106	10.97	4.78	6.19	3.2	0.51	2.69	0.7	0.07	0.63			
107	9.64	5.87	3.77	2.63	1.4	1.23	1.75	0.19	1.56			
108												
109												
110										18.89	7.88	11.01
111												
112	15.54	7.31	8.23	10.52	4.19	6.33	4.03	0.79	3.24			
113	8.08	3.03	5.05	3.05	0.45	2.6	1.06	0.23	0.83			
114	5.26	1.49	3.77	2.36	0.37	1.99	0.45	0.02	0.43			
115												
116												
117	7.69	2.35	5.34	4.75	0.71	4.04	2.08	0.49	1.59			
118	10.61	3.76	6.85	3.1	0.57	2.53	2.87	0.8	2.07			
119	16.78	6.19	10.59	3.48	0.6	2.88	0.16	0.03	0.13			
120	1.13	0.39	0.74	2.44	0.52	1.92	0.21	0.03	0.18			
121	17.29	6.6	10.69	2.27	0.35	1.92	0.75	0.45	0.3			
122												
123												
124	11.04	3.92	7.12	2.7	0.45	2.25	0.37	0.03	0.34			
125	8.88	2.85	6.03	7.45	2.16	5.29	0.28	0.01	0.27			
126	10.64	3.95	6.69	7.49	2.76	4.73	0.18	0.1	0.08			
127	9.54	3.42	6.12	2.71	0.44	2.27	0.44	0.02	0.42			
128	8.5	3.09	5.41	3.82	0.76	3.06	1.25	0.77	0.48			
129												
130												
131												
132												
133	8.79	3.03	5.76	3.67	0.69	2.98	3.25	0.95	2.3			
134												
135	5.29	1.65	3.64	8.59	1.71	6.88	1.25	0.92	0.33			
136												
137												
138												
139												
140										28.96	12.05	16.91
S	5.418	2.517	3.520	3.492	1.626	1.941	2.664	1.013	1.858	7.602	3.125	5.035
N	69	69	69	70	70	70	70	70	70	6	6	6
\bar{X}	9.888	3.422	6.291	4.566	0.872	3.600	1.185	0.217	0.868	20.759	7.844	12.807

ANEXO RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

Potencial de Hidrógeno (pH), Alcalinidad total y Relación de alcalinidades α

Fecha	pH			Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)			α		
	Primario	Secundario	Sobrenadante	Primario	Secundario	Sobrenadante	Primario	Secundario	Sobrenadante
1		6.73	7.31						
2	6.63	6.82	7.35		244	380		0.52459	0.70526
3				408	288	464	0.41177	0.56944	0.68966
4									
5									
6	6.37	6.64	7.59						
7	6.68	6.7	7.69	508	180	420	0.28347	0.5556	0.82857
8				428	248	404	0.38318	0.53226	0.77228
9	6.2	6.58	7.4						
10				424	224	484	0.23585	0.51786	0.70248
11									
12									
13	6.6	6.76	7.59						
14				416	376	428	0.32692	0.41489	0.74766
15	6.62	6.66	7.53						
16	6.65	6.9	7.58	476	332	416	0.34454	0.43374	0.77885
17				480	320	404	0.4	0.5	0.78218
18									
19	6.37	6.64	7.59						
20	6.69	6.95	7.59	508	180	420	0.28347	0.5556	0.82857
21	6.28	6.78	7.84	336	196	412	0.44048	0.59184	0.75728
22	6.26	6.72	7.26	660	252	460	0.2	0.60318	0.73044
23	6.51	6.74	7.31	580	232	316	0.15862	0.53448	0.6962
24				608	248	384	0.26974	0.54839	0.70833
25									
26	6.63	6.84	7.64						
27	6.52	6.83	7.38	404	280	364	0.39604	0.58571	0.81319
28				380	284	452	0.45263	0.6338	0.73451
29	6.27	6.72	7.35						
30	6.7	6.99	7.63	420	200	472	0.22857	0.6	0.68644
31				388	276	364	0.45361	0.57971	0.79121
32									
33	6.45	6.72	7.45						
34	7.38	6.68	7.2	524	240	460	0.41221	0.56667	0.74783
35	6.7	6.99	7.63	424	240	480	0.37736	0.51667	0.675
36				388	276	364	0.45361	0.57971	0.79121
37									
38									
39									
40	6.37	6.64	7.59						
41	6.2	6.58	7.4	508	180	420	0.28347	0.5556	0.82857

ANEXO RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

42				424	224	484	0.23585	0.51786	0.70248
43									
44									
45									
46	6.3	6.61	7.31						
47	6.21	6.69	7.09	640	320	1012	0.25	0.375	0.66008
48	6.34	6.55	7.29	1056	304	1040	0.1553	0.60526	0.58846
49	6.32	6.74	7.29	580	320	1040	0.26207	0.475	0.62692
50	6.97	7.01	7.27	1184	340	1092	0.2027	0.61177	0.71062
51				648	360	1060	0.3642	0.63333	0.66793
52									
53									
54	6.74	6.69	7.3						
55	6.68	6.8	7.77	600	280	800	0.5	0.57143	0.715
56	6.64	6.71	7.54	520	256	668	0.40769	0.625	0.76647
57	6.32	6.56	7.35	560	252	720	0.33571	0.63492	0.75
58				520	240	576	0.2	0.58333	0.8125
59									
60	6.38	6.56	6.76						
61				536	248	600	0.30597	0.51613	0.66667
62									
63	6.3	6.51	7.26						
64	6.49	6.57	7.04	760	280	604	0.26316	0.51429	0.82119
65				392	272	580	0.45918	0.54412	0.62759
66									
67	6.05	6.34	7.34						
68	6.41	6.26	7.15	512	280	676	0.15625	0.45714	0.63314
69	6.32	6.5	7.15	640	252	640	0.34375	0.39683	0.65
70	6.34	6.3	7.2	760	352	980	0.29474	0.375	0.55918
71	6.17	6.36	6.95	752	412	740	0.29787	0.36893	0.67027
72				640	404	800	0.31875	0.44555	0.575
73									
74									
75	5.95	6.49	7.71						
76	6.28	6.36	6.89	680	352	640	0.11177	0.45455	0.69375
77	6.58	6.63	7.37	700	440	952	0.34286	0.40909	0.64706
78				980	480	916	0.42449	0.51667	0.74673
79									
80									
81									
82	6.29	6.49	7.54						
83	6.3	6.51	7.26	968	460	720	0.32231	0.56522	0.83333
84				760	280	604	0.26316	0.51429	0.82119
85	6.77	6.42	7.41						
86				892	420	644	0.37668	0.52381	0.86957
87									
88	6.6	6.38	7.29						
89				904	408	760	0.4292	0.5	0.84211

ANEXO RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

90	6.49	6.63	7.34						
91				780	504	860	0.4718	0.63492	0.74419
92	6.39	6.53	7.39						
93				760	276	724	0.28421	0.63768	0.75691
94									
95	6.11	6.51	7.12						
96	6.26	6.51	7.26	836	268	760	0.16746	0.64179	0.7579
97				948	312	804	0.21097	0.61539	0.81592
98									
99	6.25	7.14	7.1						
100				1012	392	980	0.21344	0.66327	0.81633
101									
102									
103	6.59	6.39	7.38						
104	6.45	6.71	7.2	1268	368	780	0.38801	0.46739	0.86667
105	6.77	6.7	7.34	796	280	664	0.29146	0.71429	0.74096
106	6.35	7.01	7.13	1156	304	964	0.39446	0.6579	0.78838
107				1020	292	760	0.20784	0.75343	0.71579
108									
109									
110									
111	6.65	6.84	7.25						
112	6.32	6.5	7.35	836	272	688	0.32057	0.70588	0.70349
113	6.39	6.82	7.26	972	296	724	0.23045	0.5946	0.79558
114				452	260	500	0.42478	0.73846	0.832
115									
116	6.42	6.57	6.99						
117	6.42	6.59	7	660	380	804	0.3697	0.54737	0.71144
118	6.02	6.65	7.3	736	320	880	0.34239	0.5875	0.67273
119	7.08	6.79	7.24	1160	320	840	0.14828	0.55	0.78571
120	6.39	6.85	7.45	408	280	540	0.4902	0.64286	0.80741
121				1016	256	1028	0.21654	0.6875	0.77043
122									
123	6.58	6.8	7.27						
124	6.51	6.47	7.63	860	276	852	0.21861	0.5942	0.76995
125	6.23	6.67	7.39	592	592	928	0.3446	0.39189	0.75862
126	6.62	6.93	7.6	744	640	924	0.23118	0.33125	0.79654
127	6.45	6.73	7.55	508	272	520	0.17323	0.26471	0.66923
128				432	224	536	0.25926	0.42857	0.70149
129									
130									
131									
132	6.43	6.47	7.54						
133				376	216	680	0.11702	0.14816	0.68235
134	6.62	6.81	6.68						
135				376	320	440	0.26596	0.4875	0.35455
136									
137									

ANEXO RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

138									
139									
140									

S	0.241	0.186	0.228	237.802	88.668	216.823	0.099	0.108	0.084
N	69	70	70	69	70	70	69	70	70
\bar{X}	6.454	6.658	7.342	621.266	295.726	626.052	0.29	0.525	0.727

IVL y velocidad de sedimentación en los lodos contenidos en el digestor

Fecha	IVL	Vel.Sed
	mL/gSST	m/h
17	83.81058807	2.23212
35	118.4009765	1.37198
41	67.09533128	1.80232
51	72.2169792	1.62102
71	99.14051569	0.663144
110	64.55361177	0.981833
S	21.049	0.567
N	6	6
\bar{X}	82.166	1.341

Sólidos en natas

fecha	STT (g/L)	STF (g/L)	STV (g/L)	SST (g/L)	SSF (g/L)	SSV (g/L)
19-Ago	14.91	5.64	9.27	13.42	5.08	8.34
23-Sep	14.96	5.7	9.2	13.46	5.14	8.32
20-Oct	19.96	8.43	11.53	18.89	7.88	11.01
\bar{X}	17.46	6.59	10.00	15.26	6.03	9.22
S	3.54	1.59	1.33	3.15	1.60	1.55

Balance de masa de sólidos suspendidos volátiles en el digestor

Fecha	1º			2º			Influyente	sobrenadante			digestor					
	conc.	Vol	masa	conc.	Vol	masa	SSV	conc.	Vol	masa	conc.	h	h	Vol	Vol	masa
	g/L	L	g	g/L	L	g	g	g/L	L	g	g/L	ft	m	m³	L	g
1		2000			6000	0	0	8.09	6000	48540						
2		2000		5.06	6000	30360	30360	3.24	6000	19440						
3	8.23	2000	16460	6.33	6000	37980	54440		6000	0						
4																
5																
6																
7	10.14	2000	20280	2.84	6000	17040	37320	2.72	6000	16320						
8	10.11	2000	20220	6.09	6000	36540	56760		6000	0						
9																
10	15.11	2000	30220	16.19	6000	97140	127360		6000	0						
11																
12																
13																
14	4.57	2000	9140	6.59	6000	39540	48680		6000	0						
15																
16	7.06	2000	14120	5.23	6000	31380	45500	0.1	6000	600						
17	7.04	2000	14080	5.3	6000	31800	45880		6000	0	8.34		2.44	13.65	13645.60	113804.29
18																
19																
20	8.53	2000	17060	3.14	6000	18840	35900	0.745	6000	4470						
21	3.3	2000	6600	4	6000	24000	30600	1.37	6000	8220						
22	7.81	2000	15620	4.04	6000	24240	39860	2.17	6000	13020						
23	8.71	2000	17420	3.54	6000	21240	38660	2.1	6000	12600						
24	8.83	2000	17660	3.93	6000	23580	41240		6000	0						
25																
26																

27	3.2	2000	6400	4.07	6000	24420	30820	1.47	6000	8820					
28	2.9	2000	5800	4.32	6000	25920	31720		6000	0					
29															
30	6.86	2000	13720	3.09	6000	18540	32260	0.153	6000	918					
31	3.5	2000	7000	3.96	6000	23760	30760		6000	0					
32															
33															
34	5.58	2000	11160	4.12	6000	24720	35880	1.71	6000	10260					
35	4.22	2000	8440	4.05	6000	24300	32740	0.13	6000	780	8.32	2.438	13.646	13645.599	113531.380
36	4.57	2000	9140	6.59	6000	39540	48680		6000	0					
37															
38															
39															
40															
41	8.53	2000	17060	3.14	6000	18840	35900	2.1	6000	12600	20.07	2.286	11.993	11993.202	240703.561
42	8.83	2000	17660	3.93	6000	23580	41240		6000	0					
43															
44															
45															
46															
47	3.4	2000	6800	2.58	6000	15480	22280	3.18	6000	19080					
48	14.11	2000	28220	3.2	6000	19200	47420	1.22	6000	7320					
49	20.04	2000	40080	2.62	6000	15720	55800	3.49	6000	20940					
50	12.61	2000	25220	2.69	6000	16140	41360	3.24	6000	19440					
51	4.02	2000	8040	3.12	6000	18720	26760		6000	0					
52															
53															
54															
55	17.37	2000	34740	3.03	6000	18180	52920	2.4	6000	14400		2.438	13.646	13645.599	0.000
56	4.9	2000	9800	2.63	6000	15780	25580	5.6	6000	33600					
57	4.26	2000	8520	3.94	6000	23640	32160	0.3	6000	1800					
58	5.08	2000	10160	3.64	6000	21840	32000		6000	0					

59															
60															
61	4.46	2000	8920	3.65	6000	21900	30820		6000	0					
62															
63															
64	12.98	2000	25960	3.02	6000	18120	44080	3.04	6000	18240					
65	4.1	2000	8200	5	6000	30000	38200		6000	0					
66															
67															
68	5.27	2000	10540	4.44	6000	26640	37180	2.98	6000	17880					
69	6.97	2000	13940	4.48	6000	26880	40820	7.41	6000	44460					
70	9.29	2000	18580	3.76	6000	22560	41140	0.19	6000	1140					
71	4.56	2000	9120	4.21	6000	25260	34380	2.9	6000	17400	17.02	2.438	13.646	13645.599	232248.087
72	3.57	2000	7140	3.61	6000	21660	28800		6000	0					
73															
74															
75															
76	9.29	2000	18580	3.59	6000	21540	40120	3.59	6000	21540					
77	5.27	2000	10540	3.92	6000	23520	34060	3.33	6000	19980					
78	7.84	2000	15680	4.97	6000	29820	45500		6000	0					
79															
80															
81															
82															
83	6	2000	12000	3.88	6000	23280	35280	2.42	6000	14520					
84	8.52	2000	17040	2.77	6000	16620	33660		6000	0					
85		2000	0		6000	0	0	0.23	6000	1380					
86	4.97	2000	9940	3.57	6000	21420	31360		6000	0		2.438	13.646	13645.599	0.000
87															
88															
89	4.06	2000	8120	4.35	6000	26100	34220		6000	0					
90															

91	3.8	2000	7600	4.09	6000	24540	32140		6000	0						
92		2000			6000	0	0	1.04	6000	6240						
93	6.46	2000	12920	2.12	6000	12720	25640		6000	0						
94																
95																
96	8.26	2000	16520	2.84	6000	17040	33560	0.28	6000	1680						
97	7.56	2000	15120	2.71	6000	16260	31380		6000	0						
98																
99																
100	11.23	2000	22460	2.39	6000	14340	36800		6000	0						
101																
102																
103																
104	11.58	2000	23160	5.06	6000	30360	53520	0.68	6000	4080						
105	7.02	2000	14040	2.22	6000	13320	27360	0.63	6000	3780						
106	6.19	2000	12380	2.69	6000	16140	28520	1.56	6000	9360						
107	3.77	2000	7540	1.23	6000	7380	14920		6000	0						
108																
109																
110											11.01	2.438	13.646	13645.599	150238.040	
111																
112	8.23	2000	16460	6.33	6000	37980	54440	0.83	6000	4980						
113	5.05	2000	10100	2.6	6000	15600	25700	0.43	6000	2580						
114	3.77	2000	7540	1.99	6000	11940	19480		6000	0						
115																
116																
117	5.34	2000	10680	4.04	6000	24240	34920	2.07	6000	12420						
118	6.85	2000	13700	2.53	6000	15180	28880	0.13	6000	780						
119	10.59	2000	21180	2.88	6000	17280	38460	0.18	6000	1080		2.286	11.993	11993.202	0.000	
120	0.74	2000	1480	1.92	6000	11520	13000	0.3	6000	1800						
121	10.69	2000	21380	1.92	6000	11520	32900		6000	0						
122																

123															
124	7.12	2000	14240	2.25	6000	13500	27740	0.27	6000	1620					
125	6.03	2000	12060	5.29	6000	31740	43800	0.08	6000	480					
126	6.69	2000	13380	4.73	6000	28380	41760	0.42	6000	2520					
127	6.12	2000	12240	2.27	6000	13620	25860	0.48	6000	2880					
128	5.41	2000	10820	3.06	6000	18360	29180		6000	0					
129															
130															
131															
132															
133	5.76	2000	11520	2.98	6000	17880	29400		6000	0					
134															
135	3.64	2000	7280	6.88	6000	41280	48560		6000	0					
136															
137															
138															
139															
140		2000			6000	0	0		6000	0	16.91	2.743	17.270	17270.211	292039.262

S			7190.76	1.94	0	12515.87	16332.3	1.86	0	10149.1	5.04	0.13	1.52	1524.27	112097.13
N	69	74	70	70	74	74	74	44	74	74	6	9	9	9	9
\bar{X}	7.08	2000	13956.29	3.90	6000	22154.5946	35356.5	1.84	6000	6567.41	13.61	2.44	13.68	13681.13	126951.62