

ESTUDIO DE LOS REACTORES UASB PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA

FERNANDA CRISTINA MORILLO LEÓN

ELIANA FAJARDO FAJARDO



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL – AREA SANITARIA**

Manizales

2005

ESTUDIO DE LOS REACTORES UASB PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL
RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA

FERNANDA CRISTINA MORILLO LEÓN
ELIANA FAJARDO FAJARDO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL – AREA SANITARIA
Manizales
2005

ESTUDIO DE LOS REACTORES UASB PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL
RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA

FERNANDA CRISTINA MORILLO LEÓN
ELIANA FAJARDO FAJARDO

Documento presentado en cumplimiento a los requerimientos para optar el título de
Especialista en Ingeniería Ambiental – Área Sanitaria

Director
NELSON DE JESÚS GONZALES HOYOS
Ingeniero Químico
Especialista en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL – AREA SANITARIA
Manizales
2005

*A mis padres Leonardo y Mercedes
por su amor y apoyo incondicional*
Eliana

*A Dios, mi madre Gloria y mi hijo
Luis Felipe por estar siempre
presentes...*
Fernanda

AGRADECIMIENTOS

A los directivos y personal de la Empresa Metropolitana de Aseo EMAS S.A E.S.P.

A la Ingeniera Diana Faride Fandiño y Elizabeth Cárdenas por su confianza y gran apoyo.

A nuestro director Ingeniero Nelson de Jesús Gonzáles por su gran aporte durante nuestra formación.

A los ingenieros María Fanny Ocampo y Adamo Gutiérrez por su colaboración en el desarrollo de éste proyecto.

A nuestros familiares y amigos por su colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS	
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEORICO	3
2.1 RELLENO SANITARIO "LA ESMERALDA"	3
2.2 LIXIVIADOS	4
2.3 MANEJO DE LIXIVIADOS POR TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAEROBIO EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA	6
2.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA	9
2.4.1 Hidrólisis y Fermentación	11
2.4.2 Acetogénesis	11
2.4.3 Homoacetogénesis	11
2.4.4 Metanogénesis	11
2.5 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB)	12
2.5.1 Ventajas	13
2.5.2 Desventajas	13
2.6 PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO	14
2.6.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	14
2.6.2 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	14
2.6.3 NUTRIENTES	14
2.6.4 NITRÓGENO	15
2.6.4.1 Nitrógeno Total	16
2.6.4.1 Nitrógeno amoniacal	16
2.6.5 FÓSFORO	16
2.6.6 SÓLIDOS	16
2.6.7 CAUDAL, CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAULICO	17
2.6.8 PERFIL DE LODOS	17
2.6.9 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN	18
2.6.10 TAMAÑO Y FORMA	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22

3.1 Sistema de tratamiento biológico de lixiviados mediante los reactores UASB y un Homogenizador	22
3.2 Caudal, carga orgánica volumétrica y tiempo de retención hidráulico	26
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
4.1 Carga Orgánica Volumétrica y Tiempo de Retención Hidráulico en el sistema de reactores	29
4.2 Remociones de DQO, DBO, fósforo, nitrógeno en función del tiempo	30
4.3 Forma y Tamaño	32
4.4 Perfil de Lodos	34
4.5 Sedimentabilidad	36
5. CONCLUSIONES	39
6. RECOMENDACIONES	42
7. BIBLIOGRAFÍA	44

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1. Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado	5
Tabla N° 2. Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado relleno sanitario La Esmeralda	5
Tabla N° 3. Requerimientos elementales de las bacterias del metano	15
Tabla N° 4. Relaciones C:N:P	15
Tabla N° 5. Métodos y frecuencias de los análisis y seguimiento de los parámetros	25
Tabla N° 6. Equipos utilizados para el seguimiento de los parámetros	26
Tabla N° 7. Sólidos suspendidos volátiles en el reactor 1	34
Tabla N° 8. Sólidos suspendidos volátiles en el reactor 2	35
Tabla N° 9. Resultados promedios de los parámetros en seguimiento	41
Tabla N° 10. Frecuencia de análisis sugerido	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura N°1. Diagrama de flujo de sustrato durante la degradación anaerobia	10
Figura N° 2. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)	12
Figura N° 3. Clasificación tipo de lodos	20
Figura N° 4. Puntos de muestreo para caracterización del Homogenizador	22
Figura N° 5. Puntos de muestreo para caracterización de los reactores UASB	23
Figura N° 6. Puntos de muestreo para caracterización de lodos	24
Figura N° 7. Variación THR y COV en función del tiempo en el Reactor 2	29
Figura N° 8. Carga orgánica volumétrica y % de remoción en el Reactor 2	30
Figura N° 9. Carga orgánica volumétrica y % de remoción en el Reactor 1	31
Figura N° 10. Carga orgánica volumétrica y % de remoción en el Homogenizador	32
Figura N° 11. Forma y tamaño del lodo	33
Figura N° 12. Comportamiento de los SSV en función del tiempo en el Reactor 1	35
Figura N° 13. Comportamiento de los SSV en función del tiempo en el Reactor 2	36
Figura N° 14. Velocidad de sedimentación en el Reactor 1 en función del tiempo	37
Figura N° 15. Velocidad de sedimentación en el Reactor 2 en función del tiempo	37
Figura N° 16. Apreciación de la alta sedimentabilidad del lodo anaerobio	38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Resultados de caracterizaciones de los Reactores UASB y Homogenizador	47
ANEXO 2: Perfil de lodos de los Reactores UASB	56
ANEXO 3: Procedimiento Sedimentabilidad	59
ANEXO 4: Sedimentabilidad del lodo anaerobio	60
ANEXO 5: Forma y tamaño del lodo anaerobio	68

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar el estudio del impacto que tienen algunos nutrientes en la remoción de materia orgánica y la evolución del lodo frente a los mismos, en los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados provenientes del relleno sanitario La Esmeralda.

ESPECÍFICOS

1. Impacto de los nutrientes (C, N, P) en la remoción de materia orgánica en los reactores UASB del relleno sanitario La Esmeralda.
2. Evolución en forma, tamaño, sedimentabilidad y relación SSV/SST del lodo formado en las tres etapas de cada uno de los reactores UASB del relleno sanitario La Esmeralda.
3. Influencia de la alimentación en el desarrollo del lodo.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en los reactores UASB del relleno sanitario La Esmeralda. Comprende el estudio y seguimiento del afluente al sistema de reactores UASB y su influencia en el desarrollo del lodo formado en éstos.

Se realizó en tres etapas en las cuales se efectuaron cambios basándose en las relaciones C:N:P de entrada con el fin de optimizar las eficiencias de remoción en los parámetros controlados (DBO₅, DQO, SST, Nitrógeno y Fósforo), además obtener buenas características del lodo anaerobio en cada uno de los reactores.

INTRODUCCIÓN

Con la gran generación de residuos sólidos, la sociedad se ha visto en la necesidad de establecer sistemas de recolección y disposición final de éstos. Los rellenos sanitarios son una importante solución al problema de los residuos sólidos, éstos generan lixiviados, un líquido con gran carga orgánica producto de la descomposición natural de las basuras.

El tratamiento de lixiviados ha sido un gran reto para la Empresa Metropolitana de Aseo EMAS S.A. E.S.P, ya que no debe ser arrojado sin previo tratamiento a los cuerpos de agua cercanos sin que garantice el cumplimiento de la ley.

Los procesos biológicos son en la actualidad los preferidos en el tratamiento de lixiviados. En el relleno sanitario la esmeralda se cuenta con dos reactores UASB basados en principios sencillos y aptos para la descomposición biológica; el correcto monitoreo de éstos reactores garantiza el funcionamiento correcto de tal manera que pueda darse cumplimiento a la normatividad.

1. ANTECEDENTES

Los tratamientos anaerobios se han convertido en un método popular para el tratamiento de aguas residuales, tanto por su efectividad en el tratamiento de agua residual con gran carga como por sus ventajas económicas.

Desarrollado en los Países Bajos a finales de los setenta por el profesor Gatze Lettinga, el reactor UASB (lecho de lodos anaerobio de flujo ascendente, por sus siglas en inglés) fue originalmente usado para tratar agua residual producto de la refinación de azúcar, cervecías e industria del papel.

En los últimos tiempos las aplicaciones de esta tecnología han alcanzado sectores como efluentes de plantas químicas y petroquímicas, industrias textiles y tratamiento de lixiviados. En estos años, el número de reactores anaeróbicos en el mundo se está incrementando rápidamente y cerca del 72% de estos son reactores basados en la tecnología UASB.

La Empresa Metropolitana de Aseo EMAS S.A. E.S.P; lleva a cabo junto con la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales un estudio completo sobre tratamientos biológicos en UASB con lixiviados; trabajos que se recopilan a continuación.

Caicedo y Molina [1]. Remoción de materia orgánica de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda por medio de un reactor UASB. Realizaron el montaje y arranque de los reactores piloto para el tratamiento de los lixiviados, además de un reactor a escala de laboratorio. Estos reactores piloto de $2,8 \text{ m}^3$ tenían un tiempo de residencia de 48 horas, en este trabajo se lograron remociones promedio del 60%. Se realizó un método experimental para determinar la sedimentabilidad del lodo en los reactores piloto, lo cual permitió cualificar de una forma mas detallada la forma y crecimiento del lodo.

Arenas y Marín [2]. Operación de un sistema de reactores piloto UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. Los mismos reactores piloto fueron operados durante 105 días. En esta experiencia se lograron resultados favorables, durante los días de operación se forzaron continuamente las condiciones hidráulicas del sistema, llegando hasta un TRH de 18 horas. Esto habla de la capacidad de los reactores para superar su carga de diseño.

Los lodos originados en este caso indican una excelente calidad de ellos y una buena adaptación de los microorganismos al sustrato [2].

Uno de los aspectos más importantes de la operación de los reactores piloto, es la adición de nutrientes, para mejorar porcentajes de remoción. En este trabajo se midió también la producción de metano importante parámetro para determinar la actividad metanogénica de las bacterias, sin embargo, se concluyó que la producción de gas era muy baja.

Restrepo Salamanca [3]. Arranque y operación de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. La puesta en marcha de los reactores se inició el 7 de febrero de 2005, en este sistema se inoculó el reactor 1 con lodos provenientes de la fábrica de Café Liofilizado. Durante el tiempo de seguimiento de éste trabajo (primeros 84 días) se alcanzó una remoción en DQO general del 35% que se refiere a la adaptación inicial de los lodos y una remoción promedio de DBO del 50% en el reactor 1 y del 15% en el reactor 2.

Otro de los aspectos que se analizó fue el perfil de lodos en los reactores, el 4 de abril, se realizó un perfil de lodos en los reactores, usando las válvulas laterales, 6 por reactor, en este perfil se observa que la cantidad de sólidos aumenta con la profundidad de los reactores, además se ve que el reactor 2 (sin nutrientes), posee una cantidad menor de lodos que el reactor 1.

En este trabajo se presentan, así mismo, recomendaciones acerca de la periodicidad de los análisis.

2. MARCO TEORICO

2.1 RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA”

Hacia el año de 1962 se crea en la ciudad de Manizales las Empresas Publicas de Manizales E.E. P.P la cual tuvo, desde ese momento, la misión de prestar los servicios públicos de telefonía, aseo, acueducto y alcantarillado.

En 1988 la administración se dio a la tarea de solucionar el problema de la disposición de las basuras de la ciudad que venían siendo dispuestas desde principios del siglo en las orillas de la quebrada Olivares. Para esto contrato el servicio de dos firmas, Ingenieros Químicos y Civiles y la Compañía Colombiana de Consultores, entidades que efectuaron la escogencia del sitio y posterior diseño del relleno sanitario “La Esmeralda”.

A principios de 1991 se procedió a realizar las obras de infraestructura necesarias, las cuales se terminaron en mayo del mismo año, fecha en la cual se empezó a operar el sitio de disposición final con el 50% de la basura de la ciudad de Manizales [11].

Para el año de 1994 se tuvieron diagnósticos importantes sobre las áreas deficitarias de las Empresas Publicas, por lo que mediante la promulgación de la ley 142 de junio de este mismo año surge una herramienta fundamental para dar paso a la privatización del servicio de aseo, dando cabida a un proceso de participación ciudadana para la conformación de una sociedad que hoy se conoce como EMPRESA METROPOLITANA DE ASEO S.A E.S.P, El 6 de diciembre de 1994.

Desde 1995 esta empresa se encargo del servicio público domiciliario de aseo en Manizales, así como la función de prestar los servicios de recolección, transporte, y la disposición final de residuos sólidos domiciliarios.

A continuación se dan algunos datos de interés acerca del relleno sanitario “La Esmeralda” y su operación [12]:

- LOCALIZACIÓN: Al norte de la ciudad de Manizales Km. 2 vía al municipio de Neira.
- AREA: 54 hectáreas.
- VIDA UTIL: Hasta el año 2016.

- HORARIO DE OPERACIÓN: 24 horas al día, los siete días de la semana.
- CANTIDAD DE DESECHOS QUE INGRESAN: Aproximadamente 380 toneladas por día.
- MUNICIPIOS ATENDIDOS: Manizales, Chinchiná, Palestina, Risaralda, Belarcázar, Anserma, Marmato, Supia, Villamaría, Neira, Aranzazu, Salamina, Filadelfia, La Merced, San Félix y Santa Rosa de Cabal (Risaralda).
- TERRAZAS: De 5 m de altura.
- COMPACTACIÓN: Hasta alcanzar una densidad de campo de $1 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$.
- MANEJO DE LIXIVIADO: Planta de tratamiento Biológico (REACTORES UASB).
- DESTINO FUTURO: El destino final del relleno sanitario “La Esmeralda” es un gran parque en el cual estarán sembrados 10000 árboles en su mayoría de flores y un guadual de 20000 m^2 [11].

2.2 LIXIVIADOS

El lixiviado generado de desechos sólidos es una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos, sólidos disueltos y coloidales. Contiene productos de descomposición de materiales orgánicos e iones solubles que presentan un problema de polución real para aguas superficiales y subterráneas.

Los lixiviados se originan por la circulación de agua en la basura, la cual a su paso va disolviendo los elementos presentes en los residuos, cuyos constituyentes característicos se presentan en la tabla N° 1; el lixiviado es un líquido altamente agresivo al ambiente, principalmente por su elevada carga orgánica representada en términos de DQO de 3000 a 60000 $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$, valor que depende del tipo de basura depositada y de la capacidad del relleno, por ésta razón los lixiviados representan el agente contaminante mas representativo de un relleno sanitario. Estos líquidos no se quedan confinados en el relleno sanitario, sino que por condiciones de diseño del relleno, migran fuera del mismo pudiendo contaminar el suelo y las aguas superficiales y subterráneas que se encuentran a su paso.

Tabla N° 1.

CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS TÍPICAS DE UN LIXIVIADO			
<i>Edad del Relleno</i>	<i>Nuevo (< 2 años)</i>	<i>Nuevo (> 2 años)</i>	<i>> 10 años</i>
Constituyentes $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Rango	Valor Típico	Rango Típico
DQO	3000 – 60000	18000	100 – 500
DBO ₅	2000 – 30000	10000	100 – 200
COT	1500 – 20000	6000	80 -160
SST	200 – 2500	500	100 – 400
NITRÓGENO TOTAL	20 – 1500	400	100 – 200
FOSFORO TOTAL	5 – 100	30	5 – 10
ALCALINIDAD CaCO ₃	1000 – 10000	3000	200 – 1000
SALES SOLUBLES	200 – 4000	800	100 – 500
HIERRO	50 – 1200	60	20 – 200
PLOMO	1 – 10	2	0.01 – 0.5
ZINC	25 – 250	50	0.1 – 1
pH	5 - 8	6	6.6 - 7.5

Fuente: GLYNN & HEINKE, “ Environmental science and engineering”.

Tabla N° 2.

CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS TÍPICAS DE UN LIXIVIADO RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA		
<i>Lixiviado</i>	<i>Nuevo</i>	<i>Viejo</i>
Constituyentes $\left(\frac{mg}{L}\right)$	Valor Típico	Valor Típico
DQO	39150	228
DBO ₅	30500	24
SST	1382	13
NITRÓGENO AMONIACAL	1920	3.6
FOSFORO	122	2.8
pH	6.7	7.6

Fuente: Informe de ensayos octubre 26 de 2005. (EMAS)

Los lixiviados producidos en rellenos sanitarios difieren en composición y caudal según una serie de factores entre los cuales se destacan [8]:

- La composición de la basura
- Las condiciones climáticas
- La operación del relleno y el tiempo transcurrido desde que se dispuso la basura
- El sitio topográfico
- Material de cobertura final del relleno
- Capa vegetativa

El clima en el lugar del relleno influye significativamente en la velocidad de generación del lixiviado. Estos sitios localizados en áreas de alta precipitación, se puede esperar la generación de mayor cantidad de lixiviado.

Las cantidades de lixiviado generado dependen de la cantidad de líquido que contiene originalmente el desecho, de la cantidad de precipitación que entra al relleno a través de la cobertura o que cae directamente en los desechos y de la composición misma del desecho.

El carácter químico que se ve afectado por la descomposición biológica del material orgánico biodegradable, procesos de oxidación química y disolución de materiales orgánicos e inorgánicos en el lixiviado. Dentro de la composición química de los lixiviados suelen encontrarse concentraciones elevadas de productos tóxicos como metales pesados, compuestos organoclorados entre otros. Todos estos contenidos se derivan de los residuos que originalmente los poseían, los cuales se hallan dispuestos y compactados en el lecho de la basura.

La composición de un lixiviado dependerá de la composición del desecho y de las condiciones dentro del relleno como:

- Temperatura
- Contenido de humedad
- Profundidad del relleno
- Etapas de descomposición
- Remoción de las capas intermedias contaminantes
- Calidad del agua que entra al relleno

2.3 MANEJO DE LIXIVIADOS POR TRATAMIENTO BIOLÓGICO ANAEROBIO EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA

Una breve recopilación del manejo de lixiviados, se menciona a continuación:

Inicialmente el líquido se llevaba por canales a la quebrada Olivares sin ningún tratamiento previo, pero basados en las necesidades ambientales se buscó una alternativa que disminuyera el impacto ambiental; Para ello se hizo una canalización en filtros perimetrales que recolectaban el lixiviado y lo llevaban a 3 tanques de donde era recirculado al relleno con la ayuda de una motobomba. En este método se mitiga el impacto por medio de

atenuación natural y evapotranspiración potencial. En el año de 1998 se contaba con 2 estaciones de recirculación de lixiviado.

Sin embargo, ante la necesidad de modernizar y tecnificar el tratamiento del lixiviado se diseñó y construyó una planta piloto para el tratamiento fisicoquímico que comprende etapas de coagulación, floculación y sedimentación; la cual empezó su funcionamiento en septiembre del 2000 y se suspende completamente el proceso de recirculación de lixiviado. Con ésta planta se logra tratar caudales hasta de $2.2 \frac{l}{s}$. Inicialmente se obtuvieron remociones del 78.45% en DBO₅, del 81.82% en DQO y del 71.01% en sólidos suspendidos. Sin embargo como la eficiencia de la planta bajó fundamentalmente por problemas hidráulicos y características del vertimiento cambiantes frecuentemente por lo cual fue necesario diseñar un nuevo sedimentador convencional que operó a partir del segundo semestre del 2001. Los lixiviados entran a la planta por una canal que tiene un vertedero triangular, y en ese mismo canal se realiza la mezcla rápida de coagulante en un resalto hidráulico. Los lodos producidos son bombeados a los lechos de secado ubicados en la parte superior de la planta.

Un Filtro anaerobio de flujo ascendente tipo piloto en tres etapas para tratamiento de lixiviados, arrancado el 9 de octubre de 2001, filtros con lecho de grava en su interior e inoculados con estiércol de vaca y operando con un TRH de 14 horas, donde la alimentación a los filtros se realiza en serie entrando el lixiviado al primer tanque proveniente de una caneca de alimentación; del tercer filtro se obtiene el efluente final del proceso. La caneca de alimentación se carga con 148 litros de lixiviado a la cual se le adiciona nutrientes requeridos para conservar la relación 100:5:1 de C:N:P. Como resultado inicialmente se obtuvo una remoción de 21.2% en DQO según la caracterización realizada en el mismo mes de arranque. Este sistema presenta ventajas por la baja producción de lodo y bajo consumo de energía y nutrientes; después de 110 días de operación se obtuvieron remociones del 96% en DBO₅ y 88% en DQO [19].

En el segundo semestre del 2003 se arranca un sistema de reactores piloto UASB, los cuales fueron inoculados con lodo anaerobio proveniente de la fábrica de Café Liofilizado, una vez provistos completamente los reactores con lixiviado, se les suministró a cada reactor una cantidad considerable de estiércol de caballo para una correcta activación del inóculo, el tiempo en cual se consideró que los reactores habían arrancado fue dos meses con un caudal de $12 \frac{ml}{min}$ y un TRH de 2 días. A partir del arranque en un tiempo aproximado de

dos meses en sus caracterizaciones se reportan remociones del orden de 83.5% en DBO₅ y 60% en DQO, además se dedujo que el lodo que contienen los reactores es de tipo granular por su alta velocidad de sedimentación en diferentes puntos del orden de 240 m/h , 172.17 m/h , 189 m/h y 140 m/h .

Los mismos reactores piloto fueron operados en el primer semestre de 2004 durante 105 días de seguimiento. En esta experiencia se realizó seguimiento a los parámetros de control para determinar la estabilización del sistema, lográndose remociones promedio de 80% en DQO, 90% en DBO₅ y 45% en SST; durante el tiempo de operación se forzaron continuamente las condiciones hidráulicas del sistema, llegando hasta un TRH de 18 horas. Además se encontró un tamaño de lodo aproximado de 1 mm y forma semejante en los dos reactores, los perfiles de lodo reportan valores de la relación SSV/SST entre 0.6 y 0.7, al igual que la velocidad de sedimentación clasifica al tipo de lodo como floculento en un intervalo de 2 y 20 m/h .

El estudio de coagulación, floculación del efluente de tratamiento de lixiviados en un reactor anaerobio, llevado a cabo durante el segundo semestre del 2004 y cuyo propósito era diseñar un sistema fisicoquímico para el efluente del sistema de tratamiento secundario a escala real, arroja en términos generales unos valores de remoción que no superan las expectativas en él centradas como ejemplo, sólo se logró el 30% de remoción en sólidos suspendidos totales.

Uno de los puntos a resaltar en el primer semestre de 2005 es el comportamiento del homogenizador utilizado como tratamiento previo a los reactores UASB; desde que se empezó a alimentar, éste, ha sedimentado los lodos biológicos que vienen del relleno y desde entonces actúa como un reactor anaerobio, y remueve una parte importante de la carga orgánica de los lixiviados, logrando remociones de cerca del 40% en DQO.

En febrero del presente año, se arranca el sistema de reactores UASB, el cual se realizó de manera progresiva aumentando la carga de entrada mediante el aumento de caudal; este aumento se llevó a cabo en tres etapas (reactor 1), de las cuales la primera con 0.5 L/s y $4 \text{ Kg DQO/m}^3 \cdot \text{d}$ y la segunda con 0.7 L/s y $6 \text{ Kg DQO/m}^3 \cdot \text{d}$ entregaron cargas muy grandes al reactor, lo cual pudo retrasar el arranque de este reactor. En la primera etapa se

registraron remociones del 35% en DQO, en la segunda etapa la remoción cayó cerca del 15% en DQO, aquí empezó entonces un periodo de recuperación que duró 15 días, luego la remoción aumentó progresivamente hasta valores del orden de 50% en DQO, en ese momento se pasa a la etapa tres con un caudal de 1 L/s y $6,7 \text{ Kg DQO/m}^3 \cdot \text{d}$, durante el cual se obtuvieron remociones del 50% en DQO.

Como el arranque del reactor 2, se realiza sin inóculo, fue notorio los resultados en cuanto a remoción ya que en este solo se alcanzó durante el primer semestre de 2005 remociones del orden del 25% en DQO.

2.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular, nitratos y sulfatos es convertida a metano y dióxido de carbono por la combinación de la actividad de diferentes grupos de microorganismos. En el proceso intervienen microorganismos facultativos y anaerobios estrictos.

En general las bacterias son incapaces de alimentarse de material particulado por lo que las macromoléculas (proteínas, carbohidratos y lípidos) son hidrolizadas previamente por enzimas extracelulares a compuestos más simples (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos). Estos compuestos, son utilizados como sustratos por los organismos fermentadores (azúcares y aminoácidos) y por oxidadores anaerobios (ácidos grasos superiores). Los productos de estas reacciones son acetato, hidrógeno, biomasa y productos intermediarios como propianato y butirato. Estos últimos son degradados a acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias conocidas OHPA (Obligate Hydrogen Producing Acetogen) las cuales viven en relación sintrófica con las bacterias metanogénicas utilizadoras de hidrógeno. Estos dos compuestos son finalmente, los sustratos de las bacterias metanogénicas, que se dividen en dos grupos tróficos:

Bacterias Metanogénicas Hidrogenofílicas: Utilizan el hidrogeno generado para reducir el CO_2 .

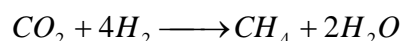
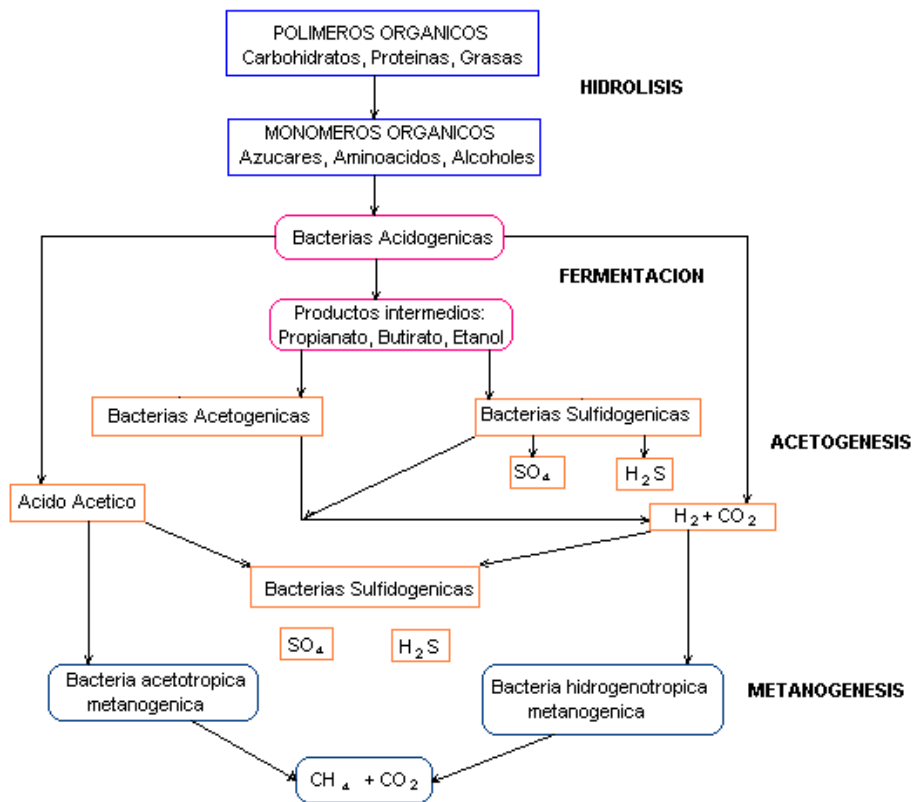
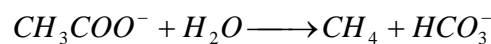


Figura N°1. Diagrama de flujo de sustrato durante la degradación anaerobia.



Bacterias Metanogénicas Acetoclástica: Transforman el acetato en CH_4 . Esta transformación constituye el 70% de la producción de metano generado en los reactores.



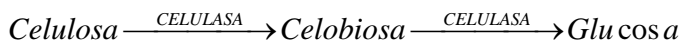
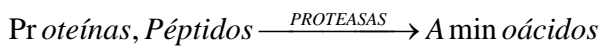
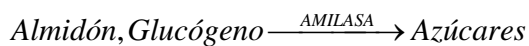
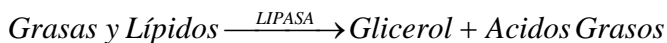
Seis procesos de conversión pueden ser identificados en la digestión anaerobia [14]:

1. Hidrólisis de Biopolímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos).
2. Fermentación de aminoácidos y lípidos.
3. Oxidación B-anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes.
4. Oxidación anaerobia de productos intermedios como ácidos volátiles (excepto acetato).

5. Conversión de acetato a metano.
6. Reducción de CO_2 a CH_4 .

2.4.1 Hidrólisis y Fermentación

Son las etapas iniciales de la digestión anaerobia donde los biopolímeros son fragmentados por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas más pequeñas así:



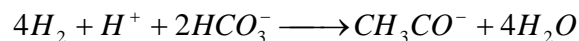
Las bacterias fermentativas metabolizan los aminoácidos, azúcares y ácidos grasos al interior de la célula. Los productos de la fermentación son ácidos grasos volátiles principalmente acético, propiónico y butírico, y adicionalmente algunos productos reducidos como etanol, acetona, butanodiol en menor cantidad.

2.4.2 Acetogénesis

Durante esta etapa las bacterias conocidas como "bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno OHPA", convierten los productos de la fermentación en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Estos organismos utilizan los ácidos grasos o alcoholes como fuente energética.

2.4.3 Homoacetogénesis

Dentro de la acetogénesis, existe un grupo de bacterias que pueden transformar la mezcla de H_2 y CO_2 , y algunos azúcares como la glucosa y fructuosa en acetato. La reacción es:



2.4.4 Metanogénesis

La última etapa de la digestión anaerobia se lleva a cabo por la actividad de un grupo de bacterias conocido como, bacterias metanogénicas. Los representantes de este grupo son anaerobios estrictos.

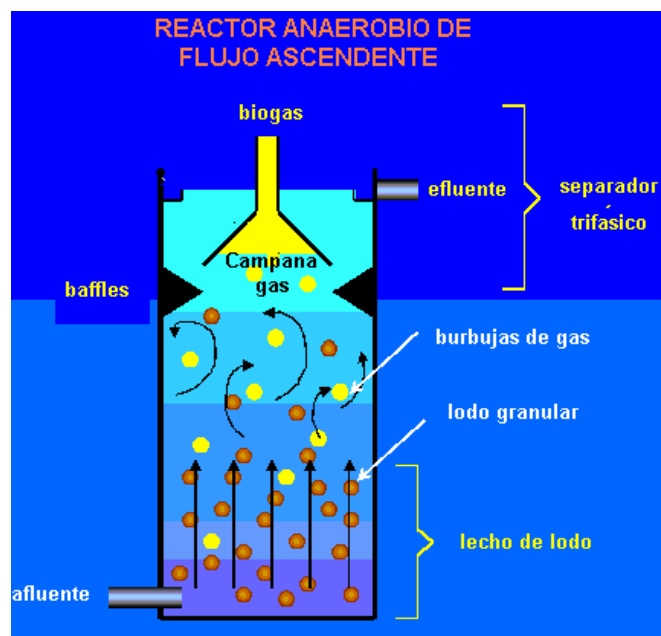
2.5 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB)

El Reactor UASB (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket) fue desarrollado en la década del setenta por Gatzke Lettinga y Colaboradores en la Universidad Agrícola de Wageningen – Holanda [13].

Este reactor ha sobresalido debido a la alta calidad del efluente producido y al relativo bajo costo del tratamiento de aguas residuales de baja y mediana carga orgánica; ha sido ampliamente aplicado también al tratamiento de aguas residuales complejas con alta carga orgánica como lixiviados.

Los resultados obtenidos de las experiencias a escala piloto y escala real efectuadas en varias partes del mundo, proporcionaron avances importantes en el desarrollo del proceso y tecnología del tratamiento anaerobio. El éxito de estas experiencias, junto a los beneficios presentados por el proceso como la ausencia de equipos de control sofisticados, moderada producción de residuos del proceso (lodos), menor consumo energético y producción de metano (combustible de alto poder calorífico), han establecido al reactor UASB como una opción de tratamiento para una amplia variedad de residuos líquidos.

Figura N° 2.



En el reactor existe una zona de reacción compartida internamente y un separador de biogas. El agua residual se distribuye en todas las secciones de reacción y en el manto de

lodos, en esta sección los contaminantes orgánicos son convertidos en biogas. El biogas provee una adecuada mezcla en el lecho y se recolecta en las tres fases. Trabaja con altas concentraciones de concentración de biomasa del orden de $20 - 30 \text{ Kg biomasa/m}^3$ (5 Kg DQO/m^3) o mejores y con tiempos de retención hidráulica de 10 horas [20].

Cuando un reactor UASB ya esta funcionando a plena capacidad y el lodo es activo, se establecen dos partes definidas: El lecho donde se encuentran las altas concentraciones de sólidos y el Manto de lodos producido por el flujo ascensional del afluente a través del lecho por la mezcla que establece el gas producido en el lodo. El manto de lodos es la zona de mayor turbulencia en la que se encuentran partículas que sedimentan y otras que ascienden hasta que se liberan del gas y sedimentan.

2.5.1 Ventajas

- Menor producción de lodos.
- Menores costos de operación.
- Convierte el 95% del C en biogas, 5% es transformado en biomasa microbiana.
- El 90% de la energía es retenida como CH₄, del 5 – 7% es almacenada en la biomasa.
- No requiere energía.
- Acepta altas cargas orgánicas.
- Degrada compuestos policlorados.
- Requerimiento bajo de nutrientes.
- Requiere pequeña área superficial.
- El lodo anaerobio puede ser preservado (inactivo) por muchos meses sin serios deterioros.
- Una efectiva separación del biogas, desagüe y el lodo.
- El lodo anaerobio presenta una buena capacidad de sedimentación y principalmente, se desarrolla como un lodo granular.

2.5.2 Desventajas

- Requiere largos periodos de arranque, si no se cuenta con lodo adaptado.
- Por ser recientemente establecidos, tienen bajo desarrollo para aplicaciones específicas y existe poca experiencia práctica, sin embargo la situación respecto a esto está cambiando rápidamente.

- La digestión anaerobia normalmente requiere de un adecuado post-tratamiento para la remoción de DBO_5 remanente, amonio y compuestos de mal olor.

2.6 PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO

2.6.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Se constituye en una prueba más rápida que la demanda bioquímica de oxígeno y es utilizada para medir la carga orgánica e inorgánica contenida en una muestra. En el bioensayo, la DBO, oxida las sustancias orgánicas fácilmente biodegradables, si se realizan bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y población biológica. En este ensayo químico, la DQO, se oxidan además de las sustancias antes mencionadas, todas aquellas que sean susceptibles de ser atacadas por un oxidante fuerte en condiciones ácidas. El inconveniente que presenta es que no determina si la materia orgánica es biodegradable o no.

2.6.2 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO_5)

La demanda bioquímica de oxígeno se usa como medida de oxígeno requerida para la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en la muestra y como resultado de la acción de oxidación bioquímica anaerobia. La demanda de oxígeno de las aguas residuales es resultado de 3 tipos de materiales.

Materiales orgánicos carbónicos, utilizables como fuente de alimentación por organismos aeróbicos.

Nitrógeno oxidable, derivado de la presencia de nitritos, amoníaco y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como alimentación para bacterias específicas.

Compuestos químicos reductores, (iones ferrosos, sulfitos sulfuros) que se oxidan por oxígeno disuelto.

2.6.3 NUTRIENTES

A fin de continuar sus funciones vitales adecuadamente, un organismo debe tener una fuente de energía y de carbono para la síntesis de nueva materia celular. Los elementos inorgánicos, tales como el nitrógeno y el fósforo, y otros elementos que se encuentran a

nivel de vestigios como el azufre, potasio, calcio y magnesio son también vitales para la síntesis celular [16].

Tabla N° 3. Requerimientos elementales de las bacterias del metano.

MACRONUTRIENTES		MICRONUTRIENTES	
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (mg/Kg células secas)	ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (mg/Kg células secas)
N	65.0000	Fe	1.800
P	10.000	Ni	100
K	10.000	Co	75
S	10.000	Mo	60
Ca	4.000	Zn	60
Mg	3.000	Mn	20
		Cu	10

Fuente: SHERER.1983.

El exceso o limitación de nutrientes influye en la producción extracelular de sustancias poliméricas las cuales se creen ser las responsables de la atadura o agregación de la biomasa [6].

Los estudios realizados en [2] y [19], recomiendan el manejo de las relaciones C:N:P para sistemas anaerobios. Muchos autores plantearon estas relaciones para aumentar la eficiencia estos sistemas.

Tabla N°4.

Relaciones C:N:P	
DQO: N :P [6]	100:7.2:1
DQO: N :P [6]	100:0.7:1
DQO: N :P [7]	350:5:1
DBO: N :P [16]	100:5:1

2.6.4 NITRÓGENO

En aguas residuales el nitrógeno puede hallarse en cuatro estados de oxidación: Nitratos, nitritos, amonio y nitrógeno orgánico.

Todas estas formas de nitrógeno, además del nitrógeno gaseoso, son biológicamente interconvertibles y forman parte de su ciclo. La química del nitrógeno es compleja debido a

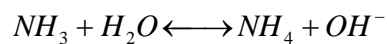
los varios estados de oxidación que puede asumir el nitrógeno (presenta siete estados de oxidación) [17].

2.6.4.1 Nitrógeno Total

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal, pueden analizarse juntos y son determinados como el nitrógeno Kjeldahl, termino que hace referencia a la técnica usada en su determinación. La forma más oxidada del nitrógeno son los nitratos (el más estable). Es necesario controlar los niveles de nitrógeno para evitar eutricación.

2.6.4.1 Nitrógeno amoniacal

Es todo el nitrógeno existente en el agua como amoniaco o el ión amonio dependiendo del pH.



$pH < 9$ Predomina el ión amonio (NH_4)

La forma no ionizada como lo es el NH_3 es tóxica, la forma iónica no lo es. Cuando el pH es bajo, una concentración de nitrógeno puede no ser tóxica porque la concentración de NH_3 es baja [16].

2.6.5 FÓSFORO

El fósforo se encuentra en las aguas naturales y residuales solo como fosfato. Las formas de fosfatos tienen variedad de oxígeno. Pequeñas cantidades de fosfatos condensados son usadas en lavanderías y otras limpiezas, porque estos materiales son los mejores constituyentes de muchos limpiadores comerciales, los ortofosfatos son aplicados a la agricultura como fertilizantes, los fosfatos orgánicos son formados en procesos biológicos.

2.6.6 SÓLIDOS

La materia suspendida o disuelta que se encuentra en un agua residual recibe el nombre de sólidos, y se dividen en tres categorías: Sólidos totales sedimentables, suspendidos y disueltos.

Sólidos suspendidos: porción retenida por el papel filtro de 1.3 μm de tamaño de poro. Estos a su vez se dividen en fijos (quedan después de la ignición de la muestra) y volátiles (pérdida de peso de la muestra durante la ignición).

La determinación de los sólidos es una prueba indispensable para la operación de reactores biológicos, que junto con otros parámetros (DBO₅ y DQO), proporcionan información de la eficiencia de la remoción del proceso, e indirectamente, de la concentración de biomasa bacteriana en el reactor.

La concentración de los SSV representa la porción orgánica de los SST. Es importante mantener un registro de los sólidos del afluente, efluente y del lecho, de modo que se pueda asegurar que la pérdida de biomasa no es mayor al crecimiento esperado. Los SST representan el parámetro ambiental para el cobro de tasa retributiva.

2.6.7 CAUDAL, CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAULICO

El caudal es físicamente de gran importancia ya que mide la velocidad superficial del líquido en el interior del reactor, condicionando la sedimentación y por lo tanto, la retención de biomasa. En ocasiones un incremento en el caudal conlleva a un aumento de carga orgánica aplicada, este se mide en volumen por unidad de tiempo. El tiempo de retención hidráulico se expresa en unidades de tiempo, y es el caudal de afluente por unidad de volumen efectivo del reactor, este tiene gran importancia ya que afecta la producción de lodos dentro del reactor.

2.6.8 PERFIL DE LODOS

Es una medida de la concentración de SST y SSV y su relación con la altura del reactor, permite el cálculo de la cantidad absoluta de lodo en el reactor. Este valor junto con la actividad metanogénica específica, delimita la carga máxima $\left(\frac{Kg \ DQO}{m^3 \cdot dia} \right)$ aplicable al sistema después de alcanzada la estabilidad en el reactor, la actividad del lodo permanecerá constante, pero el contenido de lodo aumenta regularmente.

Cuando el reactor llega a un estado estable el lodo se divide en lecho (altas concentraciones de sólidos) y manto de lodos (originado por el flujo ascensional). Algunas características de los tipos de lodos son:

- Lodo disperso: no hay agregación de partículas en el lodo, no presenta cambio importante en propiedades de sedimentación (velocidad de sedimentación $0.05 - 0.2 \text{ m/h}$).
- Lodo floculento: agregado en flóculos sueltos con propiedades intermedias de sedimentación (2 m/h).
- Lodo granular: agregado en gránulos compactos de 0.5 a 3 mm de diámetro (velocidad media de sedimentación 50 m/h).

El lodo crudo se clasifica como un lodo disperso con una relación $SSV/SST = 0.5$ que presenta poblaciones muy bajas de bacterias metanogénicas y a las bacterias sulfatoreductoras como población dominante. Con estos valores de relación, el lodo tiene una categoría de disperso y no se presenta cambios relevantes en la relación SSV/SST [4].

La obtención de un perfil de lodos (Relación de la concentración de SSV y SST), a lo alto y largo del reactor y la utilización de un sistema sencillo de integración permite el cálculo de la cantidad absoluta de lodo en el reactor; éste parámetro de control es fundamental ya que permite darse cuenta del estado y características del lodo en el reactor, además de conocer su comportamiento cuando se establecen variaciones en su funcionamiento.

2.6.9 VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

La velocidad de sedimentación indica la rapidez con que se sedimenta el lodo expresado en m/h . La elevada velocidad de sedimentación es determinante para mantener altas concentraciones de lodo biológico dentro del reactor.

En los tratamientos de aguas residuales por medio de lodos biológicos con sistemas en los que los procesos naturales son intensificados y concentrados que se puede obtener

mediante la retención de altas concentraciones de lodos biológicos bajo un tiempo de retención hidráulico relativamente corto.

En un reactor UASB la retención de lodos se efectúa de dos maneras diferentes:

1. Mediante la selección permanente de lodos con alta sedimentabilidad en el reactor de flujo ascendente.
2. Mediante un separador gas – líquido – sólido en la parte superior del reactor.

Por lo tanto la sedimentabilidad del lodo en un UASB es un dato importante en la evaluación de su comportamiento permitiendo cualificar más detalladamente la forma y crecimiento del lodo respecto a la altura del reactor.

En los reactores anaerobios, existen gránulos de lodo, con ciertas propiedades de sedimentación que permiten una mezcla mecánica por las mismas fuerzas de flujo; los procesos de mezcla inducen a la formación de lodo granular, que presenta propiedades como:

- Alta velocidad de sedimentación ($2 - 90 \frac{m}{h}$).
- Alta fuerza mecánica.
- Comunidad microbiana balanceada.
- Resistencia a descargas tóxicas.

Cuando un lodo es liviano que se lava con facilidad favorece la producción o crecimiento de biomasa. Las caracterizaciones de un lodo pueden variar de acuerdo con el tipo y el contenido de sólidos, por tanto la forma de manipular un dispositivo de muestreo depende de las propiedades físicas del lodo.

El lodo granular sedimenta extremadamente rápido y deja el agua completamente clarificada en pocos minutos, un lodo floculento empezará a clarificar en un tiempo mayor comparado con el lodo granular.

Figura N° 3. Clasificación tipo de lodos



2.6.10 TAMAÑO Y FORMA

La formación de los gránulos es una importante condición para el servicio eficiente y económico de reactores UASB.

Puntos de toma de muestras colocados espaciadamente a lo largo de las alturas de los reactores anaerobios permiten la recolección de lodo, para determinación de la concentración de sólidos.

Los reactores UASB forman gránulos que son densos conglomerados de microorganismos, el buen desarrollo del lodo granular con una alta fuerza física y buena velocidad es óptimo para el trabajo de un reactor de este tipo. Las ventajas del lodo granular son alta velocidad de sedimentación, fácil asociación de microorganismos para obtener niveles apropiados de sustrato, capacidad de separar la fase líquida y gaseosa por tener altas velocidades.

Un grano de lodo es un agregado de microorganismos formado durante el tratamiento de agua residual en un ambiente con un régimen de flujo hidráulico aproximadamente constante. Sin ningún apoyo, las condiciones de flujo creadas son selectivas para un ambiente en la cual solo estos microorganismos viven y se proliferan.

Se pueden desarrollar diferentes formas de lodo granular, tales como bastón, filamentosos y "con puntas", esto depende de varios aspectos como son la composición del sustrato y la naturaleza de la puesta en marcha.

Para determinar el tamaño y la forma de un lodo, inicialmente se realiza un análisis microscópico de una muestra representativa de cada punto de muestreo seleccionado en el sistema. La muestra previamente lavada, ya que el color oscuro del lixiviado impide la correcta observación de la distribución de los gránulos. Se determina un promedio del tamaño medio observado midiendo su longitud en importancia y además se realiza un sondeo de las diferentes formas que el lodo presenta. Esta forma de interpretación permite un estudio bidimensional de la forma.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en las instalaciones y laboratorio de la Empresa Metropolitana de Aseo (ACUATEC) y en los laboratorios de microbiología y calidad de agua de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, los cuales cuentan con los materiales y equipos necesarios para el desarrollo de las actividades.

3.1 Sistema de tratamiento biológico de lixiviados mediante los reactores UASB y un Homogenizador

Los sistemas instalados y puestos en operación a principios del 2005 como complemento al tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario La Esmeralda, se compone de un homogenizador y un sistema de reactores UASB. El primero se diseñó con el objeto de homogenizar la concentración de lixiviado que se utiliza como afluente al sistema de reactores; el segundo se compone de dos reactores en paralelo con capacidad de $1 \frac{L}{s}$ cada uno [3].

Figura N° 4. Puntos de muestreo para caracterización del Homogenizador



El lixiviado es conducido primero a un homogenizador de 100 m^3 , de ahí dos bombas de 12 hp lo llevan a un tanque de 11 m^3 el objetivo de este es proveer un sitio adecuado para la adición de los nutrientes necesarios, este tanque se encuentra 45 cm por encima del nivel máximo de lixiviado en el sistema de reactores lo cual permite la conducción de lixiviado a estos por gravedad; además a este tanque entra una corriente de lixiviado puro proveniente directamente de las nuevas celdas operadas en el relleno. Posterior al tanque existe también un pequeño mezclador con dos paredes desviadoras que forman un zigzag que conduce el lixiviado a una cámara provista con dos vertederos que distribuyen proporcionalmente el caudal al sistema de reactores.

Figura N° 5. Puntos de muestreo para caracterización de los reactores UASB



El sistema de reactores UASB, consta de dos cámaras separadas de 3 m de ancho, 10 m de largo y 3 m de profundidad para un total de 180 m^3 . Cada reactor es alimentado por 13 tubos laterales de 3 pulg que distribuyen el flujo en el fondo del reactor, el lixiviado llega a estos tubos gracias a una canaleta lateral que mediante vertederos reparte uniformemente el flujo en los tubos mencionados. Dentro del reactor existen unas pantallas en lámina de acero, que desvían los gases hacia una campana del mismo material que se encuentra por encima del nivel máximo de lixiviados y cuyo objetivo es la recolección de los mismos.

En la parte superior y a lo largo de cada reactor se tiene una canaleta provista con 55 vertederos triangulares pequeños, los cuales se encargan de recolectar el efluente de cada reactor y conducirlo a una tubería en la parte externa del reactor donde se unifica los efluentes y finalmente se llevan a una cámara de salida.

Cada uno de los reactores cuenta con 12 tuberías horizontales de 2 pulgadas que se encuentran en cuatro columnas ubicadas uniformemente a lo largo del reactor y a tres filas a diferentes alturas (50 cm, 70 cm y 90 cm del fondo del reactor hacia arriba) y sirven como puntos de muestreo para la caracterización de lodos.

Figura N° 6. Puntos de muestreo para caracterización de lodos



El monitoreo del sistema de reactores y el homogenizador se basó en la caracterización físico-química del lixiviado y de los lodos producidos, encontrando alternativas para obtener las mejores condiciones que favorezcan el funcionamiento y equilibrio del sistema.

Se observó el comportamiento durante 15 semanas. Se utilizó el reactor 2 (sin nutrientes) como blanco y se realizó cambios en la alimentación en el reactor 1, de acuerdo a las necesidades durante el tiempo, esto con el fin de conseguir mayores remociones de carga orgánica, mejores propiedades del lodo producido.

Los métodos y equipos de análisis utilizados se especifican en las siguientes tablas. Para este fin se usaron los métodos estandarizados por la APHA, AWWA y WPCF [15].

Tabla N° 5. Métodos y frecuencias de los análisis y seguimiento de los parámetros.

PARÁMETRO	FRECUENCIA	PUNTOS	MÉTODO
Fósforo	Semanal	A, B, C, D y E	Fotométrico test (14842 – 14848)
Nitrógeno Amoniacal	Semanal	A, B, C, D y E	Fotométrico 14752
Nitrógeno Total	4 Semanas	A, B y C	Titulométrico (Digestión y Destilación Buchi)
DQO	Semanal	A, B, C, D y E	Titulométrico (Reflujo con Dicromato)
DBO ₅	Semanal	A, B, C, D y E	Winkler
Sólidos (SST y SSV)	Semanal y 4 Semanas	A, B, C, D y E Llaves (1 a 12)	Gravimétrico
Caudal Reactor	Semanal	A	Volumétrico
Caudal Homogenizador	Semanal	D	Ecuación Vertedero
Perfil de lodos	4 semanas	Llaves (1 a 12)	Gravimétrico
Sedimentabilidad	4 semanas	Llaves (3, 6, 9, 12)	Anexo 3
Tamaño y forma	4 semanas	Llaves (3, 6, 9, 12)	Microscopía

El perfil de lodos se realiza utilizando todos los puntos de muestreo de cada reactor y con la metodología empleada para sólidos suspendidos por los métodos estandarizados antes mencionados [15].

Tabla N° 6. Equipos Utilizados para el seguimiento de los parámetros.

PARÁMETRO	EQUIPOS UTILIZADOS
Fósforo	- Espectrofotómetro (SPECTROQUANT NOVA)
Nitrógeno Amoniaco	- Espectrofotómetro (SPECTROQUANT NOVA)
Nitrógeno Total	- Digestor BUCHI 425 - Destilador BUCHI 315 - Espectrofotómetro (SPECTROQUANT NOVA)
DQO	- COD Reactor (HACH) - Agitador magnético con placa calefactor (CORNING)
DBO	- Incubadora Oxitop Box (WTW) - Oxidimetro (-----)
Sólidos y Perfil de lodos	- Estufa WTB BINDER (0 -203°C) - Mufla Industria TERRIGENO (0 -1200°C) - Balanza analítica OHAUS EXPLORES (0 -100 gr) - Bomba de vacío GAST (1/6 HP), - Equipo de filtración al vacío - Desecador DURAN - Papel filtro microfibras GFC 47 mm
Caudal Reactor	- Cronómetro - Probeta 1000 ml
Sedimentabilidad	- Cronómetro - Probeta 100 ml

3.2 Caudal, carga orgánica volumétrica y tiempo de retención hidráulico

Debido a la variabilidad de los lixiviados con el clima, fue imposible tener diferentes cargas y tiempos de retención hidráulicos controlados, el seguimiento de éstas condiciones de funcionamiento y operación del reactor son fundamentales puesto que permiten comparar bajo que parámetros el sistema opera de manera óptima.

Las ecuaciones utilizadas se presentan a continuación:

Tiempo de retención Hidráulica

$$THR = \frac{Volumen}{Caudal}$$

Carga Orgánica Volumétrica

$$COV = \frac{DQO_{AFLUENTE} \times Caudal}{Volumen}$$

Para los análisis de los parámetros caracterizados, el porcentaje de remoción, se calcula así:

Porcentajes de Remoción

$$\% \text{ Remoción} = \left(\frac{\text{PARAMÉTRO}_{\text{AFLUENTE}} - \text{PARAMÉTRO}_{\text{EFLUENTE}}}{\text{PARAMÉTRO}_{\text{AFLUENTE}}} \right) \times 100$$

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante 14 semanas comprendidas entre el 18 de julio y el 18 de octubre del 2005, se realizó el estudio detallado de los reactores UASB, que comprendió el seguimiento de los parámetros más relevantes DQO, DBO₅, SST, fósforo, nitrógeno amoniacal y total, perfil de lodos, sedimentabilidad, forma y tamaño del lodo.

En el transcurrir del tiempo con la recopilación de datos durante las semanas 2 a 6, se realizó un cambio en la alimentación al reactor 1; basándonos en que el éxito del funcionamiento de los reactores UASB esta ligado a la relación C:N:P 100:7.2:1 [6].

Es evidente según las tablas (anexo 1), que en la semana 6 se tiene la siguiente proporción de nutrientes 21361:1410:103 de lo cual es evidente la insuficiencia para cumplir la relación

que debe existir entre fósforo y nitrógeno $\frac{N}{P} = \frac{7.2}{1} = 7.2$ y $\frac{N}{P} = \frac{1410}{103} = 13.7$; una modificación

en la carga orgánica (carbono) fue complicado ya que es muy variable y depende del tipo de lixiviado. Con las relaciones anteriores se realizó una adición de 8 Kg de DAP (Difosfato de Amonio) el cual contiene un 46% de fósforo y un 18% de nitrógeno; cada 3 días según el tiempo de retención hidráulico manejado en ésta época.

Durante las semanas 10, 11 y 12, el reactor 1 seleccionado para monitoreo, por problemas ajenos a éste estudio salio de funcionamiento afectando significativamente el desarrollo del trabajo; sin embargo se continuó el seguimiento al reactor 2 y paralelamente al homogenizador.

En los resultados obtenidos en el homogenizador, en la semana 10 (tablas N° 10 y 11, anexo 1) se observó que el lixiviado efluente de éste sistema utilizado como parte del afluente del reactor 2 incrementaba únicamente el caudal y diluía la carga entrante al reactor 2; por tal motivo se tomó la decisión de suspender el bombeo del homogenizador al reactor 2. Este cambio nos permitió tener mejores relaciones C:N:P en la alimentación para mejorar la eficiencias de remoción en el reactor 2.

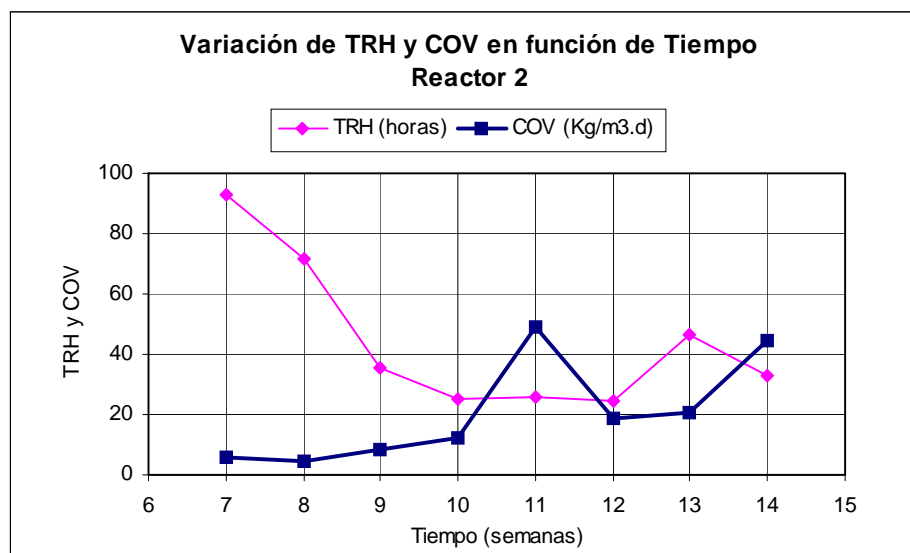
El buen desempeño de los reactores UASB esta relacionado a la cantidad de materia orgánica que se tenga en el sistema alimentado, dicha cantidad para nuestro caso es considerablemente alta a partir de la semana 11, por tal motivo fue necesario el seguimiento

de la alcalinidad como un parámetro de control del efecto buffer del lixiviado y así evitar la inhibición del sistema, en el caso de estudio este parámetro es favorable como se puede observar en el anexo 1, tabla N° 9, a pesar de las altas cargas.

En los reportes de los resultados del homogenizador referenciados anteriormente, se aprecia que las características del lixiviado afluente en este han cambiado a características de un lixiviado viejo, anexo 1, tablas 10 y 11. Tratando que el homogenizador incremente sus remociones, se procedió a realizar una caracterización completa para determinar la relación C:N:P 100:7.2:1y con ésta se tomó decisiones , las cuales se presentan como 630:1650:80. Lo anterior por los antecedentes que se tienen del desempeño del homogenizador como un reactor anaerobio. Con estas relaciones se obtuvo que la cantidad de DAP a adicionar fuera de 15 Kg cada 17 horas (TRH). Este tiempo de retención tan pequeño nos permitió realizar una caracterización al siguiente día y se determinó que ésta no influía relativamente en las relaciones, además el manejo de esta adición representa un elevado costo en la operación del homogenizador.

4.1 Carga Orgánica Volumétrica y Tiempo de Retención Hidráulico en el sistema de reactores

Figura N° 7.



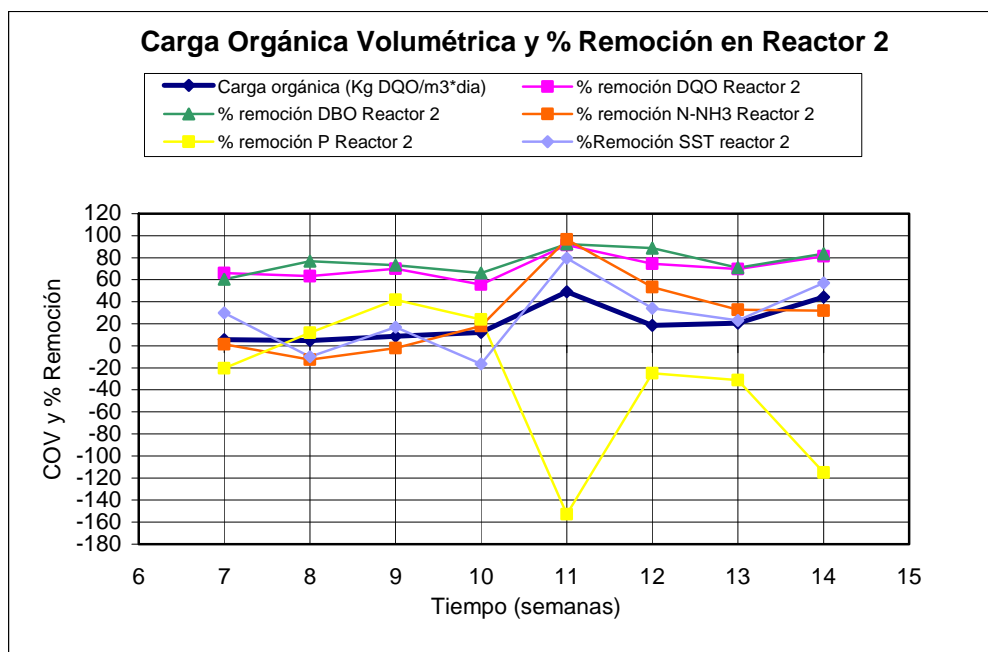
Se realizaron pruebas de DQO del afluente para conocer el contenido de materia orgánica presente en el lixiviado, encontrándose valores máximos de $45 \text{ KgDQO}/\text{m}^3.\text{dia}$ en el sistema de reactores. En la semana 11 donde se maneja únicamente el reactor 2 con un afluente de lixiviado puro se encontraron valores de cargas de $50 \text{ KgDQO}/\text{m}^3.\text{dia}$.

La carga orgánica de entrada al sistema tiene una tendencia a incrementarse como se aprecia en la figura 7. Es de notar que en la figura 7, el tiempo de retención hidráulico del sistema se mantiene estable en un rango promedio entre 24 horas.

4.2 Remociones de DQO, DBO, fósforo, nitrógeno en función del tiempo

En el sistema UASB cuando se forzó la carga orgánica (semana 11) fue posible tener mayores remociones de DBO₅, DQO, SST y nitrógeno del orden del 92, 91, 80 y 96 % respectivamente, caso contrario se tiene con las remociones de fósforo, las cuales al incrementar la carga disminuyen considerablemente hasta valores de -115% en el reactor 2, como se observa en la siguiente figura.

Figura N° 8.

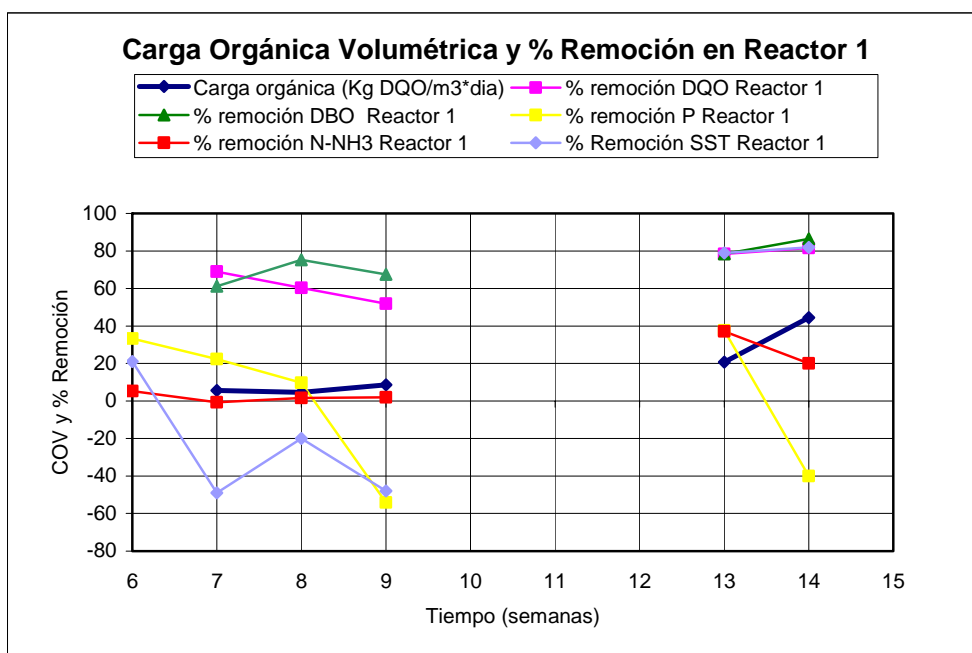


Valores promedios de remoción de DBO₅, DQO, SST, nitrógeno y fósforo son: 73, 64, 36, 17 y -15 % respectivamente para el reactor 2.

Es apreciable que al trabajar bajas cargas (semanas 7 a 10), en un rango de 1 a 10 $\text{KgDQO}/\text{m}^3.\text{dia}$, las remociones de DBO₅ y DQO no superan el 80%, los SST tienden a incrementar en el efluente del sistema al igual que el nitrógeno y se tiene un comportamiento totalmente diferente con el fósforo que es cuando mejores remociones presenta llegando a valores del 40% figura 8.

En la semana (14) en el reactor 1 se obtuvieron remociones de DBO₅, DQO, SST y nitrógeno del orden de 86, 81, 82, 20 % respectivamente, caso contrario se tiene con las remociones de fósforo, las cuales al incrementar la carga disminuyen considerablemente hasta valores de -40% en el reactor 1, como se muestra en la siguiente figura:

Figura N° 9.

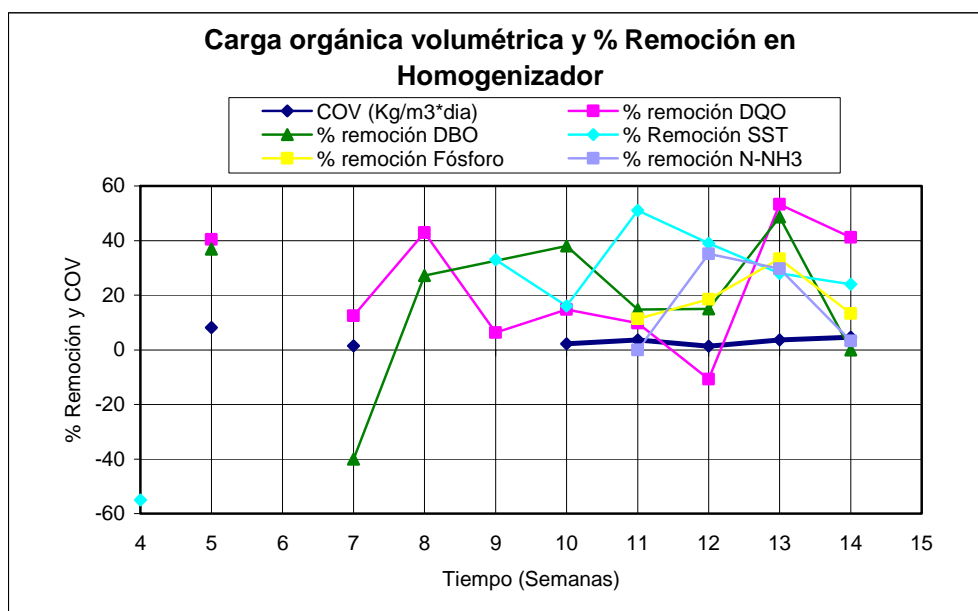


Valores promedios de remoción de DBO₅, DQO, SST, nitrógeno y fósforo son 71, 55, 22, 6 y 8 % respectivamente para el reactor 1.

La carga orgánica presente en el afluente del homogenizador no supera los valores de $10 \frac{KgDQO}{m^3.dia}$, lo cual es relativo con las remociones de DBO_5 , DQO y SST. Fue notorio cuando se realizo los muestreos entre las semanas 11 y 14 que el alto contenido de nitrógeno en el homogenizador era propio del lixiviado y así lo confirmaron los resultados (anexo 1, tabla 13). Un comportamiento similar presento el fósforo (anexo 1, tabla 14).

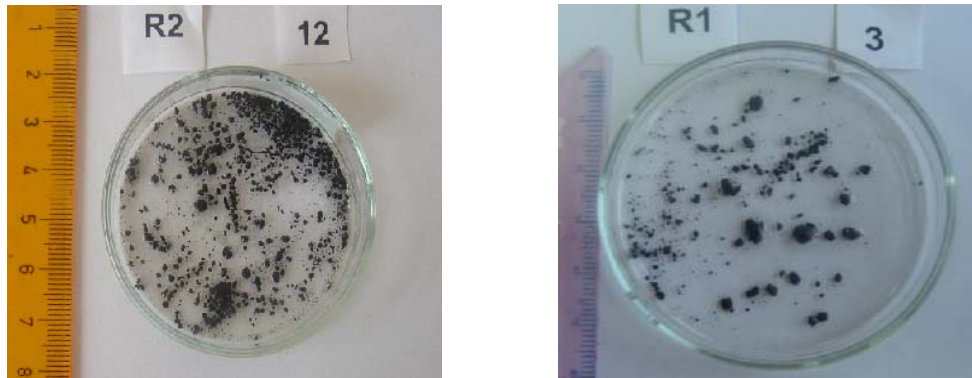
Con el bajo rendimiento que tuvo el homogenizador se alcanzaron valores máximos de remoción de DQO del 52%, SST del 50%, DBO_5 del 48%, nitrógeno del 35% y fósforo del 32% en las diferentes caracterizaciones realizadas.

Figura N° 10.



4.3 Forma y Tamaño

Por las dificultades a la hora de manejar los lodos para cuantificar su tamaño y cualificar su forma, se tomo la decisión de realizar este análisis en los puntos 3, 6, 9 y 12 de cada reactor (figura N° 4) correspondientes a la fila más baja.



En los reactores UASB el tamaño de los gránulos de lodo anaerobio aumenta con transcurso del tiempo y las condiciones de sedimentación que se tienen en estos. Se realizó una sedimentación del lodo presente en los reactores 1 y 2, en la que se encontró una forma definida ovalada y un tamaño promedio de 1 mm de diámetro. También se observaron diferencias entre el lodo de los dos reactores, la consistencia del lodo del reactor 2 (sin inoculo) fue mejor en todo sentido como cantidad, forma, tamaño y velocidad de sedimentación. Con el muestreo realizado es posible afirmar que en los reactores 1 y 2 el lodo se encuentra completamente formado en los puntos de muestreo 3, 6, 9 y 12 correspondientes a la primera fila de abajo hacia arriba.

Figura N° 11. Forma y tamaño del lodo.



Semana 14 (18 de octubre 2005).

En la semana 10 el reactor 1 sale de funcionamiento, por lo tanto el seguimiento de forma y tamaño se realiza únicamente al reactor 2, observando un incremento en su tamaño del 100%. Conservando su forma definida.

En la última valoración realizada en la semana 14 (18 de octubre) se encontró lodo granular con un tamaño promedio de 3 *mm* de diámetro de consistencia compacta y muy homogéneo en toda la muestra analizada; la forma de el lodo granular es ovalada como se puede apreciar en las fotografías reportadas en la semana 14.

4.4 Perfil de Lodos

Los perfiles de lodo se realizaron cada mes en cada uno de los reactores utilizando los 12 puntos de muestreo provistos para cada uno de ellos anexo 4.

Los resultados obtenidos indica una homogeneidad en la presencia de sólidos en cada una de las filas de los reactores, con esa seguridad tomamos valores promedios de SSV como se observa en las siguientes tablas:

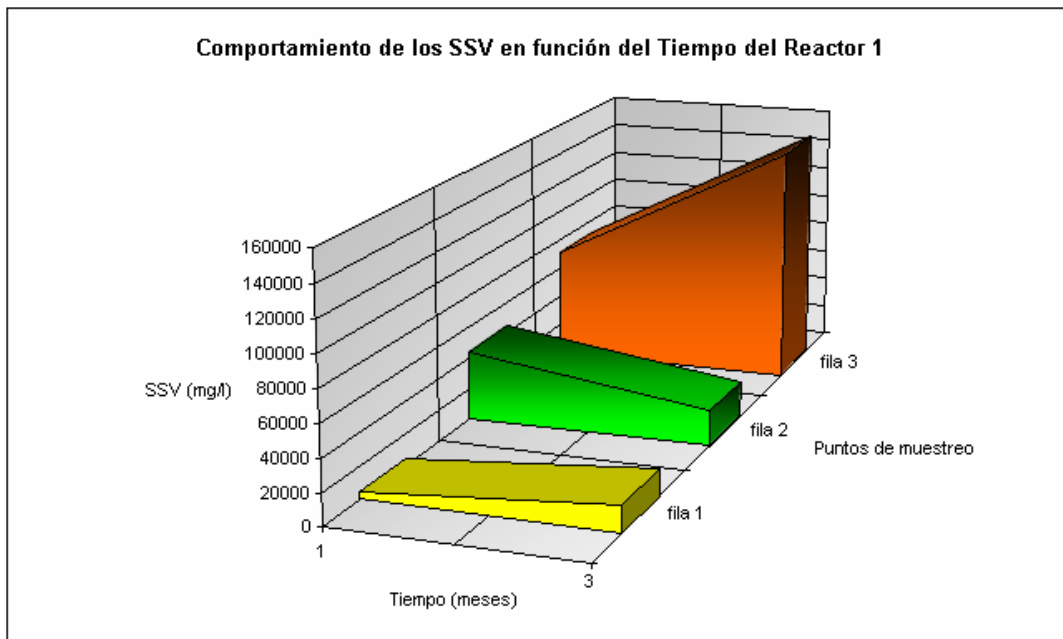
El contenido de SSV en las filas de muestreo 1 y 3 en el reactor 1 nos indica un crecimiento de lodo al igual que el aumento de su concentración en el transcurrir del tiempo como se observa en la figura 12. Además en el punto más bajo (fila 3) es significativamente notorio las altas concentraciones de sólidos.

En el punto intermedio de muestreo (fila 2) se observa un decrecimiento al transcurrir del tiempo de los SSV que se atribuye a que esta puede ser la toma de mayor reacción.

Tabla N° 7.

Sólidos suspendidos volátiles SSV ($\frac{mg}{l}$)		
Reactor 1		
	Mes 1	Mes 3
Fila 1	4239	16331
Fila 2	44281	22886
Fila 3	71437	150973

Figura N° 12.

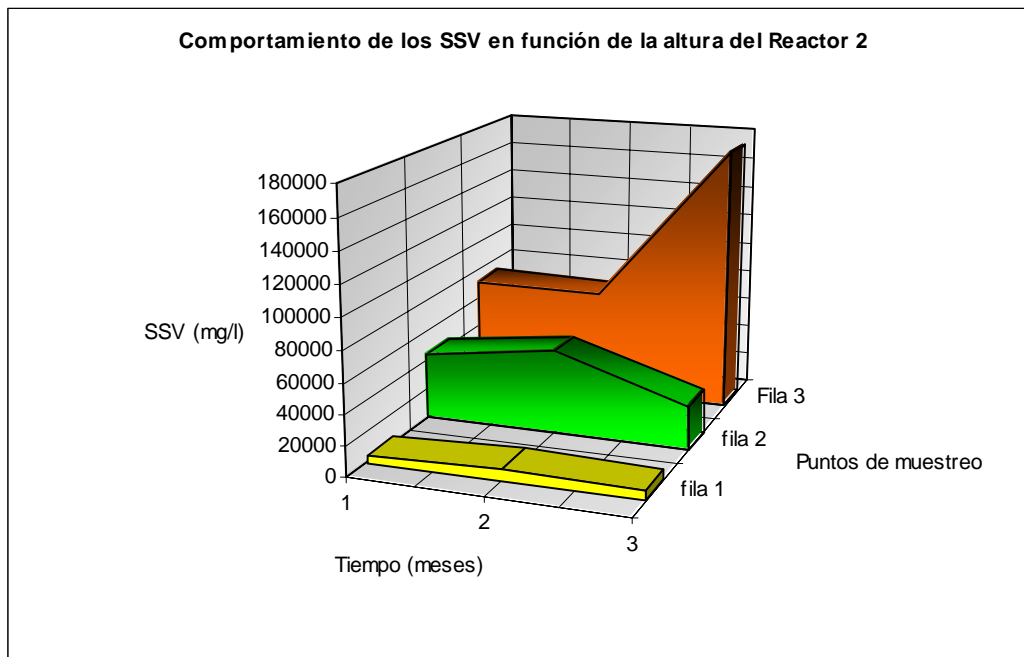


En el reactor 2 se presenta un comportamiento para el primer mes muy fluctuante en cuanto al contenido de sólidos, incrementando en forma ascendente de la fila 1 a la fila 3. Durante el segundo mes en las filas 1 y 2 hay un leve incremento; mientras que en la fila 3 se mantiene casi constante; caso contrario se presenta en el tercer mes donde se alcanzan concentraciones promedio de 174000 mg/l en la zona inferior del reactor.

Tabla N° 8.

Sólidos suspendidos volátiles $SSV \left(\frac{mg}{l} \right)$			
Reactor 2			
	Mes 1	Mes 2	Mes 3
Fila 1	5308	8056	6283
Fila 2	44181	55313	28398
Fila 3	71438	70400	174394

Figura N° 13.



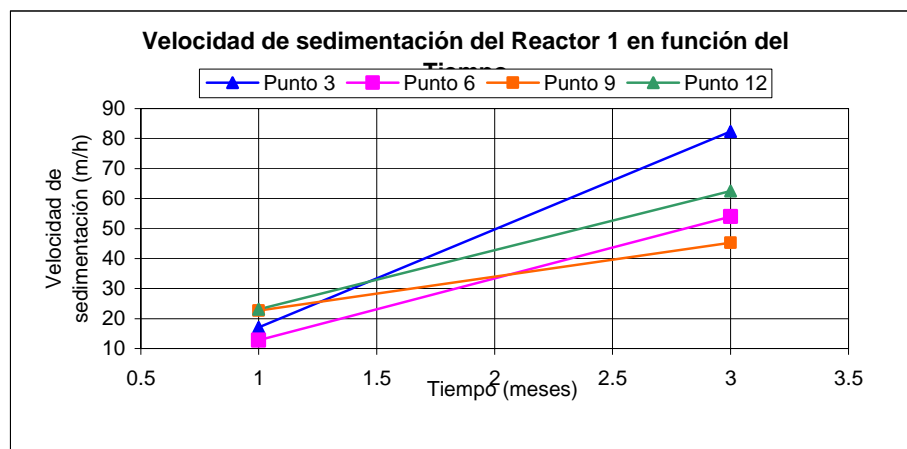
En los perfiles realizados se observa que la cantidad de lodos presente en el reactor 1 es menor que en el reactor 2; el reactor 1 tiene una acumulación de lodos más lenta, esto se aprecia con los valores de SST (anexo 2).

El rango de la relación $\frac{SSV}{SST}$ debe estar entre 0.6 y 0.5 [8], en el reactor 1 se encontraron valores promedios de orden de 0.6 y en el reactor 2 del 0.75. Indicando una excelente calidad de lodo. Como se puede apreciar en el anexo 2, es notorio el incremento de materia orgánica en los diferentes tiempos de análisis que se realizaron, especialmente en las semanas 6 y 10.

4.5 Sedimentabilidad

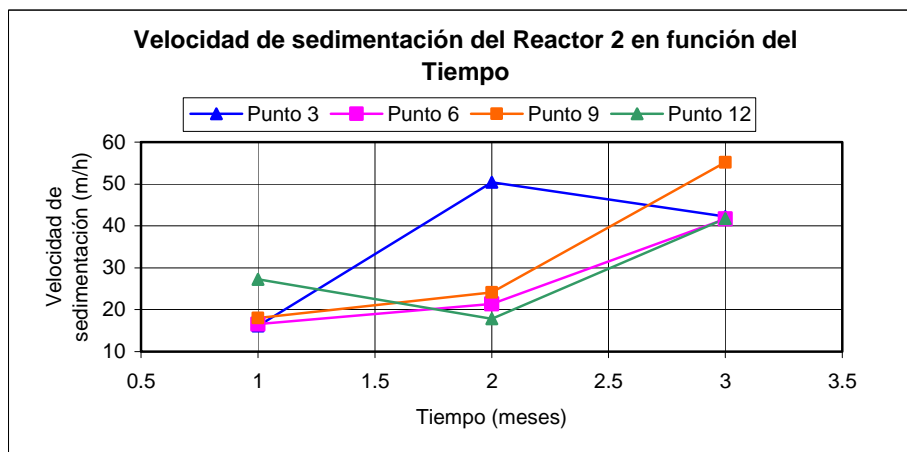
La velocidad de sedimentación es una función del tamaño de las partículas, (tablas 1, 2 y 3, anexo), tanto el largo del tamaño de la partícula y los gránulos del lodo anaerobio son esenciales para calificar las propiedades de estas partículas.

Figura N° 14.



Observando las figuras 14 y 15, el desarrollo del lodo hasta la semana 14 fue favorable presentándose valores promedios de velocidad de sedimentación en el reactor 1 de $60 \frac{m}{h}$ y en el reactor 2 de $50 \frac{m}{h}$, lo cual nos indica que es un tipo de lodo granular muy bien formado por todas las características que se han podido observar.

Figura N° 15.



En el desarrollo de las pruebas de sedimentabilidad se hizo notoria la alta velocidad en el momento de realizar las pruebas con las probetas invertidas, quedando el agua totalmente clarificada, como se observa a continuación (método, anexo 3).

Figura N° 16. Apreciación de la alta sedimentabilidad del lodo anaerobio.



a) Sedimentabilidad al instante de invertir la probeta.



b) Sedimentabilidad a los dos minutos de invertir la probeta.

Como se puede apreciar en el afluente del sistema de reactores esta relación es mayor a 0.6 lo que confirma su alto contenido de materia orgánica y en su efluente esta relación es menor de 0.5 que confirma la disminución en la materia orgánica [7].

5. CONCLUSIONES

- En el seguimiento realizado se encontró una relación directamente proporcional entre la carga orgánica volumétrica y la eficiencia que presenta el sistema, como se obtuvieron en la semana 11 que se alimentó con una carga de $49 \frac{KgDQO}{m^3 dia}$ y se dieron las siguientes remociones: DBO 92.3%, DQO 91.4%, Nitrógeno 96.6% y SST 79.5%. Caso contrario se presenta con la remoción de fósforo, al aumentar la COV, la eficiencia en remoción disminuye, llegando a valores para la misma semana de -153%.
- Con las relaciones C:N:P que se manejaron no es posible controlar el sistema de reactores ya que la composición de los constituyentes en el afluente cambian continuamente a pesar que se cuenta con un tanque de homogenización.
- Claramente se observó que el lixiviado puro utilizado como afluente al sistema UASB durante el último mes de monitoreo es óptimo y no se requiere adición alguna de nutrientes lo que se corrobora con los resultados de eficiencias de remoción obtenidos.
- Con los resultados de este estudio se reafirma que los sistemas UASB pueden trabajar con cargas orgánicas muy elevadas y nos permite decir que es uno de los mejores tratamientos biológicos utilizando lixiviados, es de resaltar el bajo costo en operación que es requerido.
- La adición de DAP realizada en el reactor 1 durante la semana 6 no dio resultados favorables, aunque se tuvo un leve incremento en las eficiencias de remoción, no es el método adecuado por la inversión que esto conlleva. Caso similar se presentó en el homogenizador.
- El comportamiento del fósforo con los cambios realizados no es favorable pues en los resultados se observa que éste posiblemente tenía una acumulación y no era totalmente aprovechado por la alimentación.

- No se presentan cambios radicales en el caudal de lixiviado generado en el relleno, permaneció en un rango de $56.16 \text{ m}^3/\text{día}$, por la misma razón el tiempo de retención hidráulico se mantuvo en un promedio de 1 día.
- La cantidad de sólidos en los dos reactores incrementó al transcurrir del tiempo, presentándose mayor cantidad de estos en su parte más profunda. La cantidad de materia orgánica incrementó más en el reactor 2, llegando a valores de 174000 mg/l y relaciones SSV/SST del orden de 0.7.
- Los sistemas UASB bien monitoreados no presentan olores y vectores que puedan influir en la apreciación y funcionamiento.
- La forma del lodo en general es ovalada, el tamaño de los gránulos de lodo fue incrementándose notoriamente hasta llegar a valores promedios de 2 mm en la zona de lodos de los reactores. Aparentemente la consistencia de los lodos del reactor 2 se formó lentamente y sin inóculo.
- Por las propiedades de sedimentación de los dos reactores, los lodos en ellos se clasifican como granular presentando velocidades de sedimentación de hasta 80 m/h .
- Las características del lodo durante el periodo de monitoreo han sido cada vez más favorables. La literatura nos dice que en cuanto a tamaño y velocidad de sedimentación, este lodo ha alcanzado valores del 80% o más de los máximos que un lodo granular puede presentar.
- Tomando 50 ml de muestra de lodo lavado para la prueba de sedimentación, fue evidente que este tiene una rapidez muy alta y representa una buena condición.
- Los efluentes del sistema de reactores UASB en las condiciones manejadas (altas cargas), representan un alto porcentaje en el cumplimiento de la normatividad para el vertimiento de aguas residuales.

- Consideramos que el sistema UASB esta funcionando en buenas condiciones y a pesar de los antecedentes [3]. Los reactores mantienen estables sus eficiencias en remoción a cualquier cambio realizado.
- Durante la experiencia fue posible realizar un seguimiento continuo al reactor 2, y con el transcurrir del tiempo este reactor ha tenido mayor estabilización que el reactor 1. Caso contrario se presenta en el primer semestre del 2005. En general apreciamos que el efluente del reactor 2 al igual que sus lodos reportan mejores condiciones.

Tabla N° 9. Resultados promedios de los parámetros en seguimiento

PARAMETRO	Reactor 1	Reactor 2
Remoción DBO (%)	71.0	73.0
Remoción DQO (%)	55.0	64.0
Remoción SST (%)	21.7	36.1
Remoción Fósforo (%)	6.4	17.1
Remoción Nitrógeno (%)	7.6	-15.4
Sedimentabilidad (m/h)	60	50
Forma	Ovalada	Ovalada
Tamaño (mm)	2	2

- El valor promedio de alcalinidad en el afluente es de $9500 \frac{mg}{l}$ de $CaCO_3$, lo cual nos indica la capacidad que tiene el reactor para resistir incrementos de carga orgánica; por lo tanto no afecta la estructura del sistema.
- Las altas velocidades de sedimentación permiten tener una alta carga hidráulica en los reactores UASB y una actividad biológica constante.
- En cuanto a la comparación realizada con los valores de nitrógeno total y amoniacal como parámetros de seguimiento en los laboratorios ACUATEC y el de la Universidad Nacional, no se encuentran diferencias significativas, esto nos permite afirmar que a pesar de los métodos empleados en el laboratorio ACUATEC los resultados son confiables y se pueden seguir aplicando.

6. RECOMENDACIONES

- Para el manejo de muestras de lodos (sedimentabilidad, tamaño y forma), se deben tomar muestras representativas y no en todos los puntos de cada fila; después de realizar una homogenización se debe tomar un volumen de muestra entre 10 y 20 *ml* de cada fila, ya que las características que se presentan son muy similares y solo se deben reportar los valores más representativos.
- Debido a que en el efluente de los reactores es notorio la alta cantidad de sólidos suspendidos y fósforo, además de una buena concentración de materia orgánica. Se sugiere considerar estudios posteriores para un tratamiento de este efluente.
- Por el alto crecimiento de los lodos, la cantidad de ellos en los dos reactores es aproximadamente entre 15 y 20% del volumen de cada uno, es necesario una purga de ellos por lo menos cada tres meses en las 4 llaves inferiores de cada reactor, para mantener una actividad biológica homogénea en todo el lecho.
- La colmatación que presenta el homogenizador por las condiciones de trabajo tenidas requiere una extracción de por lo menos la mitad de los lodos contenidos actualmente y así pueda reactivar su funcionamiento.
- Se debe considerar que el monitoreo de éstos reactores tiene que ser más frecuente por las variaciones que a diario se presentan. Se recomienda la siguiente periodicidad:

Tabla N° 10. Frecuencia de análisis sugerido

Análisis	Frecuencia
DQO	Semanal
DBO ₅	Semanal
SST	Semanal
Fósforo	Quincenal
Nitrógeno	Quincenal
Alcalinidad	Quincenal
Perfil de lodos	Mensual
Sedimentabilidad	Mensual
Forma y tamaño	Mensual
Caudal	Diario

- Adicional al estudio realizado, por las buenas características del lodo, el seguimiento al biogas producido es indispensable un dispositivo de control para cuantificarlo y darle un posterior aprovechamiento.
- Continuar con el mantenimiento general de los reactores y sus alrededores.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. CAICEDO F, MOLINA J. Remoción de materia orgánica de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda por medio de un reactor UASB. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2003.
2. ARENAS J, MARIN P. Operación de un sistema de reactores piloto UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2004.
3. RESTREPO S. Arranque y operación de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2005.
4. WILLS B, SIERRA J, MOLINA F, AGUDELO R, SALDARRIAGA J. Algunos procedimientos de mejoramiento de lodos en reactores tipo UASB en condiciones dinámicas de operación. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Diciembre de 2002.
5. TUAN ANH NGUYEN. Methods for UASB Reactor Desing.
6. PUÑAL A, TREVISAN M, ROZZI A, LEMA J. Influence of C:N ratio on the start-up of up-flow anaerobic filter reactors. University of Santiago de Compostela. 2000.
7. BORZACCONI, L. LOPEZ, I. OHANIAN, M. VIÑAS, M. Degradación anaerobia de lixiviados de relleno sanitario y posterior tratamiento aerobio. Facultad de Ingeniería Uruguay.
8. AGUDELO, G. Rubén Alberto. Tratamiento de lixiviados producidos en el relleno sanitario curva de rodas de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtros anaerobios FAFA. Universidad de Antioquia. Medellín.
9. Memorias sexto seminario taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales. Bucaramanga. Noviembre de 1996.

10. DIAZ, B. Maria Consuelo. Aspectos bioquímicos y microbiológicos de la digestión anaerobia. Universidad Nacional de Colombia.1994.
11. RIVERA, N. VALENCIA, N. Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. 2003.
12. HERRERA, B. LADINO, L. Mejoramiento del sistema de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario La Esmeralda. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 2001.
13. LETTINGA, G. HULSHOFF, P. Anaerobic wastewater treatment technology with emphasis to upflow anaerobis sludge bed (UASB) reactor system. Universidad del valle. Cali 1995.
14. DIAZ, M. Ensayos de caracterización de lodos y reactores anaerobios. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1994.
15. APHA, AWWA y WPCF. Métodos estandarizados para el análisis de agua potable y residual. Editorial Díaz de Santos S.A. España. 1989.
16. TCHOBANOGLIOUS, G. BURTON, F. MERCALF & EDDY, INC. Ingeniería de aguas residuales. Editorial Mac-Graw Hill. Interamericana de España. 1995.
17. GIRALDO, G. Manual de análisis de aguas. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 1995.
18. Informes de actividades. Plan de cumplimiento de tratamiento de lixiviados relleno sanitario La Esmeralda. 2000-2005.
19. MENDOZA, P. LOPEZ V. Estudio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario La Esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en filtro anaerobio piloto de flujo ascendente. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 2004.
20. www.uasb.org/discover/agsb.htm.

ANEXOS

ANEXO 1: RESULTADOS DE CARACTERIZACIONES DE LOS REACTORES UASB Y HOMOGENIZADOR.

ANEXO 2: PERFIL DE LODOS DE LOS REACTORES UASB.

ANEXO 3: PROCEDIMIENTO SEDIMENTABILIDAD.

ANEXO 4: SEDIMENTABILIDAD DEL LODO ANAEROBIO.

ANEXO 5: FORMA Y TAMAÑO DEL LODO ANAEROBIO

ANEXO 1. RESULTADOS DE LAS CARACTERIZACIONES EN LOS REACTORES UASB Y HOMOGENIZADOR

Tabla N° 1.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO : DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO_5) (mg/L)					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
2	7000.00	1140.00	2160.00	79.43	69.14
3	3000.00	1020.00	1020.00	66.00	66.00
4	6450.00	2160.00	2160.00	66.51	66.51
5	6900.00	1860.00	1860.00	73.04	73.04
6	5159.99	1980.00	1860.00	61.62	63.94
7	8039.99	3119.99	3179.99	61.19	60.44
8	9000.00	2220.00	2100.00	75.33	76.66
9	4250.00	1380.00	1140.00	67.52	73.17
10	7750.00	---	2640.00	---	65.93
11	23400.00	---	1800.00	---	92.30
12	29399.99	---	3359.99	---	88.57
13	27869.66*	5990.6 0*	8160.00	78.50	70.72
14	26399.99	3599.99	4319.99	86.36	83.63

Tabla N° 2.

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO : DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) (mg/L)					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
2	16405.53	6783.41	7336.41	58.65	55.28
3	5825.24	4893.20	4893.20	16.00	16.00
4	15878.78	4800.00	4800.00	69.77	69.77
5	12764.61	5156.39	5156.39	59.60	59.60
6	6102.32	5804.65	2418.6.	4.87	60.36
7	21361.25	6617.07	7246.07	69.01	66.07
8	13856.21	5490.19	5098.04	60.37	63.20
9	12800.00	6160.00	3840.00	51.87	70.00
10	12714.06	---	5634.12	----	55.68
11	52244.89	---	4489.79	---	91.41
12	19065.42	---	4859.81	---	74.51
13	39813.95	8558.14	12093.02	78.50	69.62
14	60900.90	11243.24	11315.31	81.53	81.42

Tabla N° 3.

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO : NITRÓGENO TOTAL (NKT) (mg/L)					
LABORATORIO ACUATEC					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
6	1226.00	1220.00	1310.00	0.49	-6.85
11	460.00	---	890.00	---	-93.47
14	2000.00	2600.00	1600.00	-30.00	20.00

Tabla N° 4.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO : NITROGENO AMONIACAL (NH_3) (mg/L) LABORATORIO ACUATEC					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
2	1330.00	1270.00	1340.00	4.51	-0.75
4	1100.00	1310.00	1310.00	-19.09	-19.09
5	710.00	660.00	660.00	7.00	7.00
6	940.00	890.00	950.00	5.32	-1.06
7	1410.00	1420.00	1300.00	-0.71	1.30
8	1200.00	1180.00	1350.00	1.66	-12.50
9	1550.00	1520.00	1580.00	1.93	-1.93
10	1450.00	---	1190.00	---	17.93
11	35600.00	---	1200.00	---	96.62
12	2060.00	---	960.00	---	53.39
13	2260.00	1420.00	1520.00	37.17	32.74
14	1700.00	1360.00	1160.00	20.00	31.76

Tabla N° 5.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO : NITROGENO AMONIACAL (NH_3) (mg/L) LABORATORIO U.N.					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
11	1808.80	---	1574.72	---	13.49
14	1041.86	904.70	777.60	13.16	25.36

Tabla N° 6.

PARÁMETRO FISCOQUÍMICO : <i>NITROGENO TOTAL (NKT)</i> (mg/L)					
LABORATORIO U.N.					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
11	2362.08	---	2000.32	---	15.31
14	1249.02	1111.93	1051.00	10.97	15.85

Tabla N° 7.

PARÁMETRO FISCOQUÍMICO : <i>FOSFORO (P)</i> (mg/L)					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
2	112.00	74.00	74.00	33.92	33.92
4	---	---	---	---	---
5	67.00	55.00	55.00	17.90	17.90
6	87.00	58.00	47.00	33.30	45.90
7	103.00	80.00	124.00	22.33	-20.38
8	102.00	92.00	90.00	9.80	11.76
9	72.00	111.00	42.00	-54.16	41.66
10	121.00	---	92.00	---	23.96
11	26.00	---	66.00	---	-153.00
12	80.00	---	100.00	---	-25.00
13	106.00	66.00	154.00	37.70	-31.17
14	40.00	56.00	86.00	-40.00	-115.00

Tabla N° 8.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO : <i>SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)</i> (mg/L)					
Semana	Entrada Reactor	Salida Reactor 1	Salida Reactor 2	% Remoción Reactor 1	%Remoción Reactor 2
2	1160	590	600	49	48
4	1790	725	566	59.5	68
6	2430	1918	800	21	67
7	2183	3266	1533	-49	30
8	1650	1980	1820	-20	-10
9	1760	2600	1460	-48	17
10	3290	-	3830	-	-16.5
11	2880	-	590	-	79.5
12	3557	-	2350	-	34
13	4143	875	3200	79	23
14	3110	560	1330	82	57

Tabla N° 9.

PARÁMETRO: <i>ALCALINIDAD</i> (mg/L)	
Semana	Entrada Reactor
11	9200
12	9650
13	9650
14	10050

HOMOGENIZADOR

Tabla N° 10.

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO			
<i>DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO₅) (mg/L)</i>			
Semana	Entrada Homogenizador	Salida Homogenizador	% Remoción Homogenizador
2	10250.00	6500.00	36.58
3	---	---	---
4	7875.00	5850.00	25.70
5	2850.00	1800.00	36.84
6	---	---	---
7	1250.00	1750.00	-40.00
8	550.00	400.00	27.20
9	---	---	---
10	630.00	390.00	38.00
11	405.00	345.00	14.81
12	300.00	255.00	15.00
13	350.00	180.00	48.57
14	495.00	495.00	0.00

Tabla N° 11.

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO			
<i>DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO) (mg/L)</i>			
Semana	Entrada Homogenizador	Salida Homogenizador	% Remoción Homogenizador
4	13090.91	11515.15	12.0
5	8695.10	5181.67	40.4
6	---	---	---
7	2233.85	1954.62	12.5
8	935.00	533.32	42.9
9	2509.80	2352.90	6.3
10	3586.73	3055.92	14.8
11	2530.61	2285.71	9.7
12	2766.35	3065.42	-10.8
13	3348.80	1562.80	53.3
14	4900.90	2882.88	41.2

Tabla N° 12.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO <i>NITROGENO AMONIACAL (NH₃) (mg/L)</i> LABORATORIO ACUATEC			
Semana	Entrada Homogenizador	Salida Homogenizador	% Remoción Homogenizador
11	1650	1650	0
12	2480	1610	35.1
13	2090	1470	29.7
14	1240	1200	3.2

Tabla N° 13.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO <i>NITROGENO AMONIACAL (NH₃) (mg/L)</i> LABORATORIO U.N			
Semana	Entrada Homogenizador	Salida Homogenizador	% Remoción Homogenizador
11	1723.68	1830.08	-6.2
14	1148.49	904.78	21.2

Tabla N° 14.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO <i>FOSFORO (P) (mg/L)</i>			
Semana	Entrada Homogenizador	Salida Homogenizador	% Remoción Homogenizador
11	80	71	11.3
12	54	44	18.5
13	51	34	33.3
14	60	52	13.3

Tabla N° 15.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO			
<i>SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST) (mg/L)</i>			
Semana	Entrada Homogenizador	Salida Homogenizador	% Remoción Homogenizador
2	1920	836	56
4	1105	1720	-55
9	82	55	33
10	76	64	16
11	132	64	51
12	81	50	39
13	103	75	28
14	124	94	24

$$V_{HOMOGENIZADOR} = 100m^3$$

Tabla N° 16.

COV y TRH EN EL HOMOGENIZADOR		
Semana	COV $\left\langle \frac{Kg DQO}{m^3 * dia} \right\rangle$	TRH (dias)
5	8.11	1.07
6	---	1.07
7	1.37	1.63
8	---	---
9	---	---
10	2.19	1.63
11	3.56	0.71
12	1.26	2.18
13	3.61	0.92
14	4.57	1.07

Tabla N° 17.

CAUDALES MEDIDOS EN REACTOR Y HOMOGENIZADOR (m^3/dia)			
Semana	Reactor 1	Reactor 2	Homogenizador
5	---	---	93.30
6	---	---	93.30
7	23.33	23.33	61.30
8	30.24	30.24	---
9	60.48	60.48	---
10	---	86.40	61.30
11	---	84.67	140.80
12	---	87.26	45.80
13	46.65	46.65	108.00
14	65.66	65.66	93.30

$$V_{REACTOR} = 90m^3$$

Tabla N° 18.

CARGA ORGÁNICA VOLUMETRICA $\left(\frac{Kg DQO}{m^3 * dia}\right)$		
Semana	Reactor 1	Reactor 2
7	5.53	5.53
8	4.65	4.65
9	8.60	8.60
10	---	12.20
11	---	49.15
12	---	18.48
13	20.64	20.64
14	44.33	44.33

Tabla N° 19.

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAULICO (<i>dias</i>)		
Semana	Reactor 1	Reactor 2
7	3.86	3.86
8	2.97	2.97
9	1.48	1.48
10	---	1.04
11	---	1.06
12	---	1.03
13	1.92	1.92
14	1.37	1.37

ANEXO 2: PERFIL DE LODOS

Tabla N° 1.

Reactor 1 Semana 6			
Punto de muestreo	$SST \left(\frac{mg}{L} \right)$	$SSV \left(\frac{mg}{L} \right)$	SSV/SST
1	3850	1625	0.4220
2	4030	1760	0.4384
3	73150	43650	0.5967
4	5830	3100	0.5317
5	17200	9200	0.5348
6	67300	37710	0.5603
7	12700	6800	0.5354
8	6950	3050	0.4388
9	79250	39800	0.5022
10	10460	5430	0.5194
11	1500	1000	0.6667
12	51800	23500	0.4536

Tabla N° 2.

Reactor 2 Semana 6			
Punto de muestreo	$SST \left(\frac{mg}{L} \right)$	$SSV \left(\frac{mg}{L} \right)$	SSV/SST
1	5550	3550	0.6396
2	78000	49625	0.6362
3	103700	65500	0.6316
4	10350	6250	0.6038
5	69200	43000	0.6214
6	125200	79650	0.6362
7	9800	6230	0.6360
8	70800	44400	0.6271
9	99950	67050	0.6708
10	9425	5200	0.5517
11	73950	40100	0.5422
12	121700	73550	0.6043

Tabla N° 3.

Reactor 2 Semana 10			
Punto de muestreo	$SST \left(\frac{mg}{L} \right)$	$SSV \left(\frac{mg}{L} \right)$	SSV/SST
1	10800	6550	0.6065
2	86900	53950	0.6210
3	127450	80650	0.6328
4	12375	7575	0.6121
5	82600	51850	0.6277
6	119050	76850	0.6455
7	12775	10225	0.8000
8	88650	55950	0.6311
9	110905	25400	0.2290
10	12375	7875	0.6363
11	102300	59500	0.5816
12	146100	98700	0.6755

Tabla N° 4.

Reactor 1 Semana 14			
Punto de muestreo	$SST \left(\frac{mg}{L} \right)$	$SSV \left(\frac{mg}{L} \right)$	SSV/SST
1	14680	9080	0.6185
2	31120	19320	0.6208
3	268800	191700	0.7130
4	15750	11150	0.7079
5	28475	17325	0.6084
6	189700	131700	0.6940
7	24934	15134	0.6069
8	51900	34550	0.6667
9	202250	135350	0.6700
10	47600	29960	0.6294
11	34700	20350	0.5864
12	214143	145143	0.6780

Tabla N° 5.

Reactor 2 Semana 14			
Punto de muestreo	$SST \left(\frac{mg}{L} \right)$	$SSV \left(\frac{mg}{L} \right)$	$\frac{SSV}{SST}$
1	8100	5420	0.6692
2	42060	29425	0.6995
3	249600	188780	0.7660
4	11180	8180	0.7316
5	59166	45933	0.7763
6	184800	124050	0.6712
7	9320	5680	0.6094
8	40610	18075	0.4451
9	279667	218145	0.7800
10	7625	5850	0.7672
11	38120	20160	0.5288
12	229200	166600	0.7268

ANEXO 3. PROCEDIMIENTO SEDIMENTABILIDAD

Velocidad de sedimentación (Pasos a seguir)

- Tomar 200 *ml* de muestra de lodo y lavar muchas veces con agua utilizando una tela con poro grande.
- Colocar 50 *ml* de lodo lavado en la probeta de 1000 *ml* y aforar con agua hasta el tope.
- Tapar la probeta en la parte superior y homogeneizar el lodo y el agua invirtiendo varias veces la probeta.
- Colocar la probeta en forma invertida y registrar la distancia recorrida en cierto tiempo hasta que éste llegue a sedimentar completamente.
- Con los datos obtenidos construya una gráfica de la distancia recorrida en función del tiempo.
- En la gráfica trazar una recta tangente a la curva en donde la pendiente es más pronunciada, que es donde se tiene la mayor velocidad de sedimentación, prolongar la recta hasta que intercepte la mayoría de datos.
- Obtener la pendiente mediante la relación $m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$, donde las *Y* y las *X* son las ordenadas y abscisas de los puntos de intercepción de las dos gráficas.
- La pendiente de ésta recta corresponde a la velocidad máxima de sedimentación bajo las condiciones de la prueba.

ANEXO 4: SEDIMENTABILIDAD DEL LODO ANAEROBIO

Semana 6. 22 Agosto 2005

Figura N° 1.

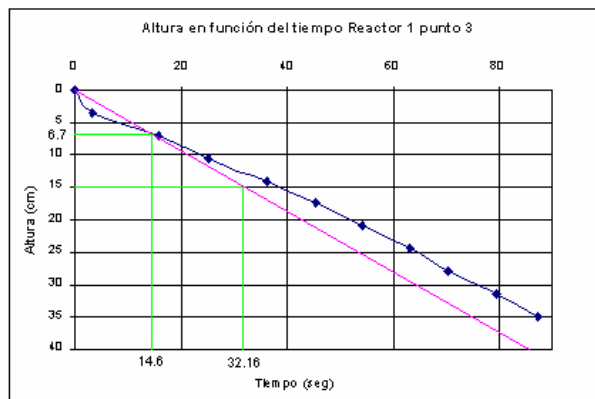


Figura N° 2.

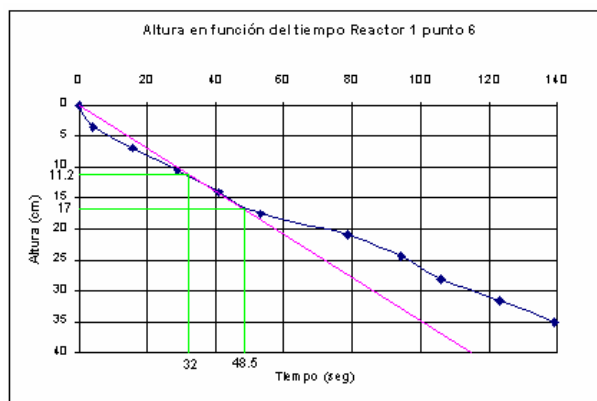


Figura N° 3.

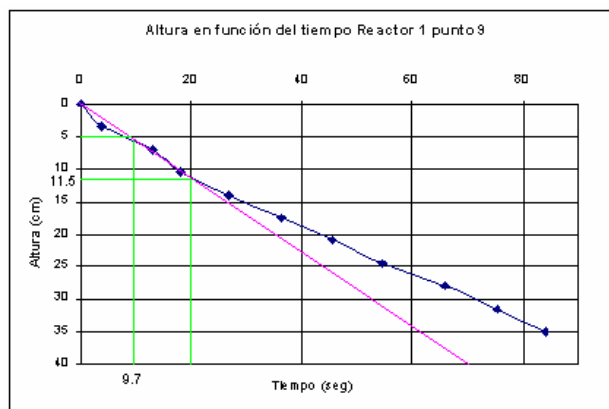


Figura N° 4.

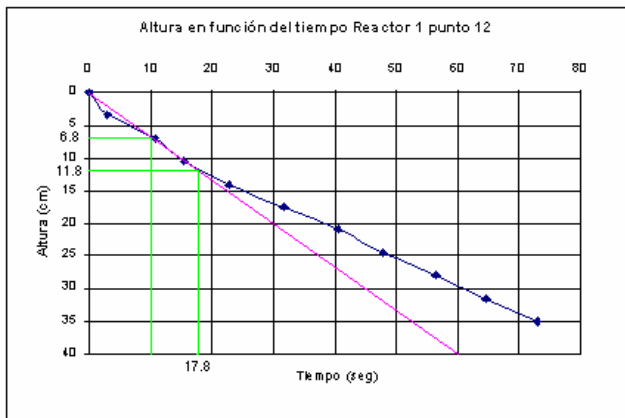


Figura N° 5.

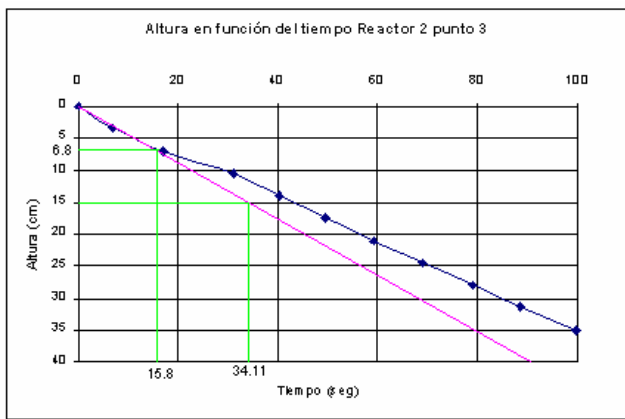


Figura N° 6.

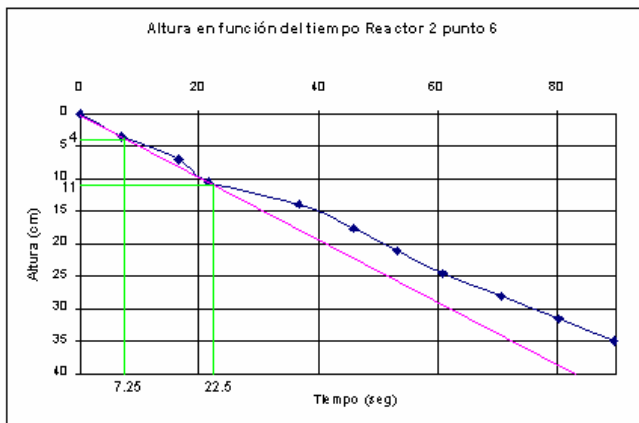


Figura N° 7.

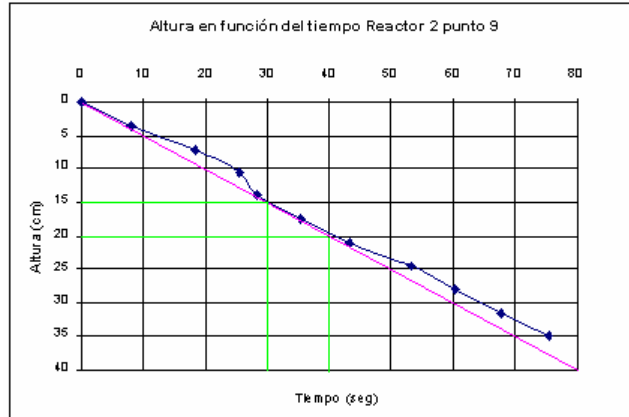


Figura N° 8.

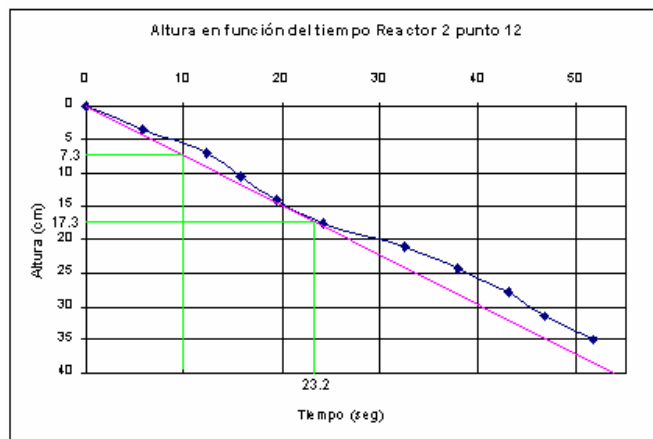


Tabla N°. 1.

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL LODO ANAEROBIO (Ensayo semana 6)					
Reactor 1			Reactor 2		
Punto	Vel. Sed. (cm/s)	Vel. Sed. (m/h)	Punto	Vel. Sed. (cm/s)	Vel. Sed. (m/h)
3	0.4726	17.02	3	0.4470	16.12
6	0.3550	12.78	6	0.4590	16.52
9	0.6310	22.71	9	0.5000	18.00
12	0.6410	23.07	12	0.7500	27.27

Semana 10. 19 Septiembre 2005

Figura N° 9.

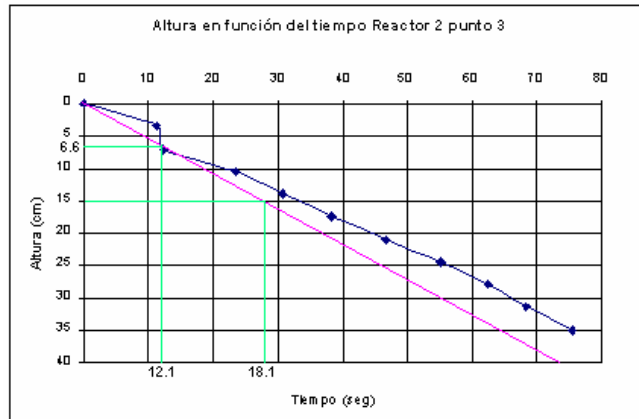


Figura N° 10.

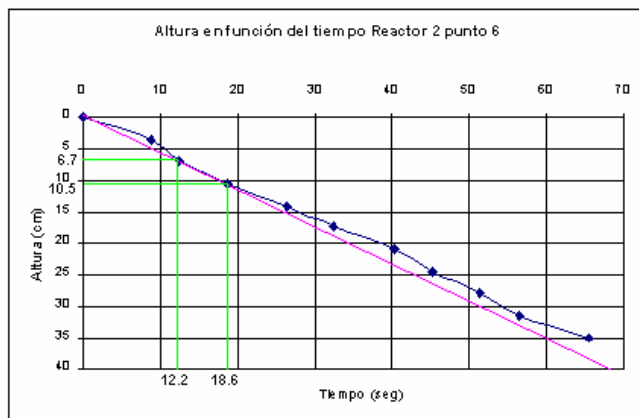


Figura N° 11.

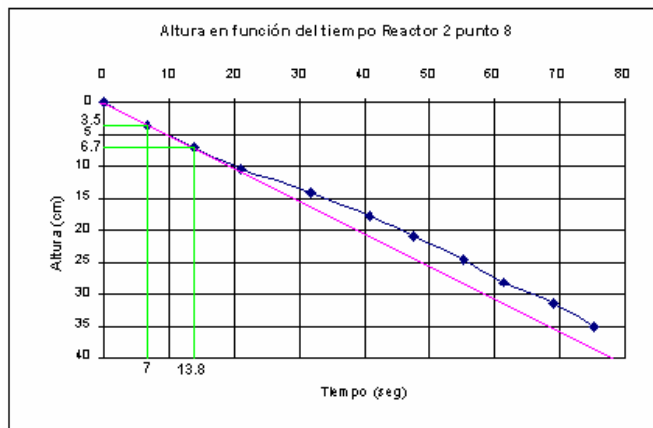


Figura N° 12.

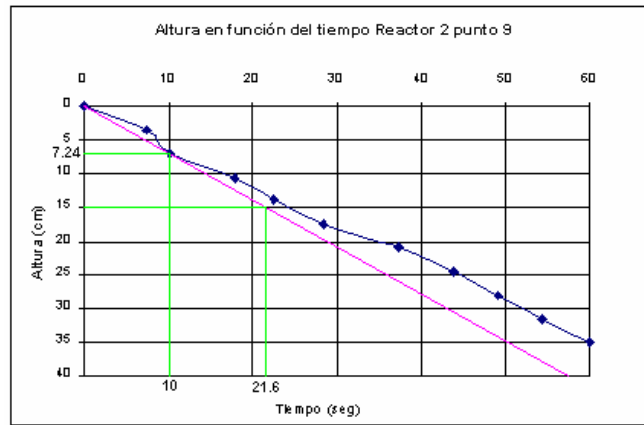


Figura N° 13.

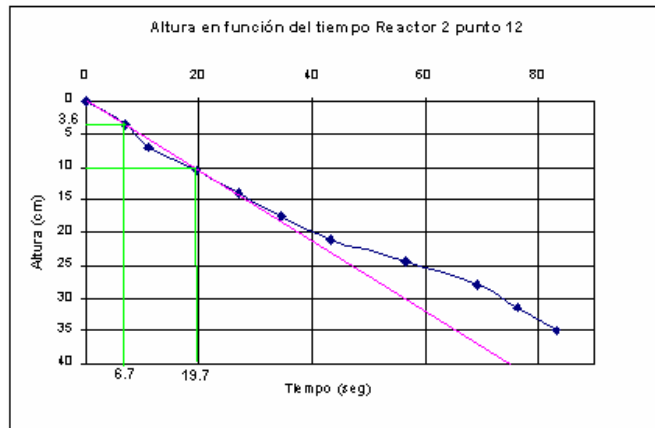


Tabla N°. 2.

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL LODO ANAEROBIO (Ensayo semana 10)		
Reactor 2		
<i>Punto</i>	<i>Vel. Sed. (cm/s)</i>	<i>Vel. Sed. (m/h)</i>
3	1.4014	50.40
6	0.5941	21.38
8	0.4930	17.75
9	0.6689	24.1
12	0.4926	17.82

Semana 14. 18 de octubre 2005

Figura N° 14.

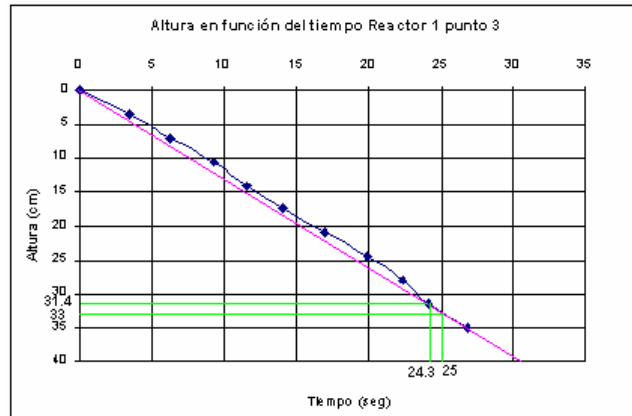


Figura N° 15.

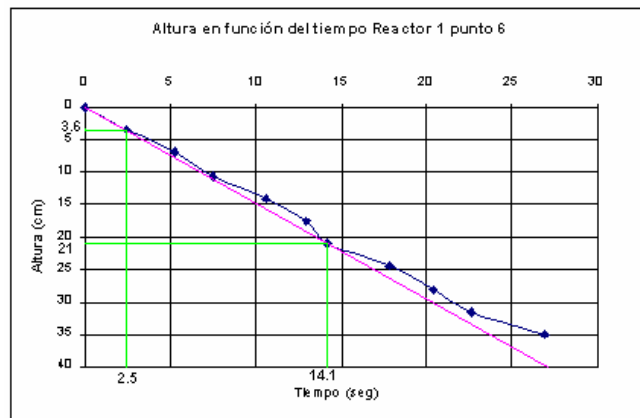


Figura N° 16.

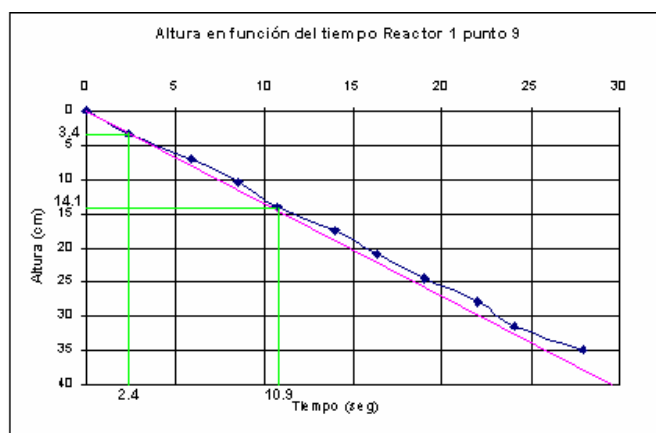


Figura N° 17.

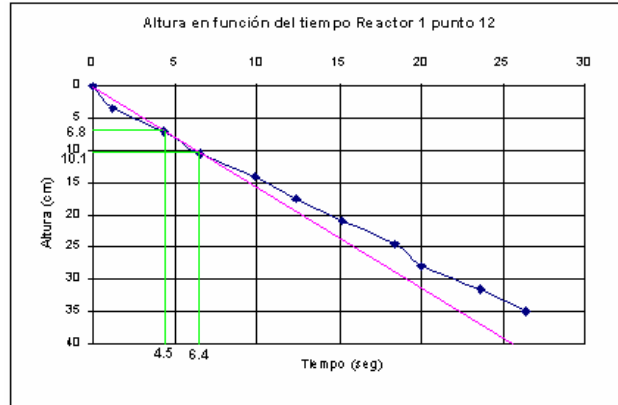


Figura N° 18.

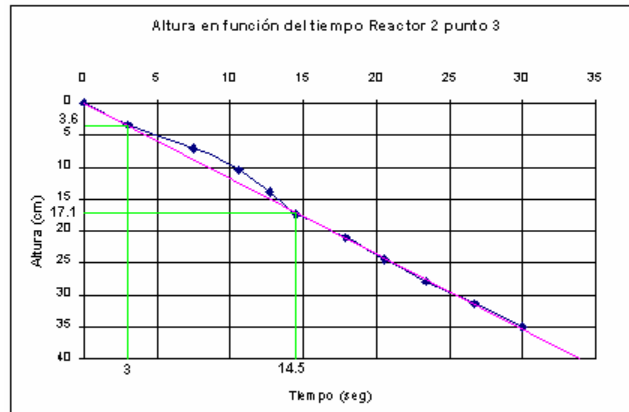


Figura N° 19.

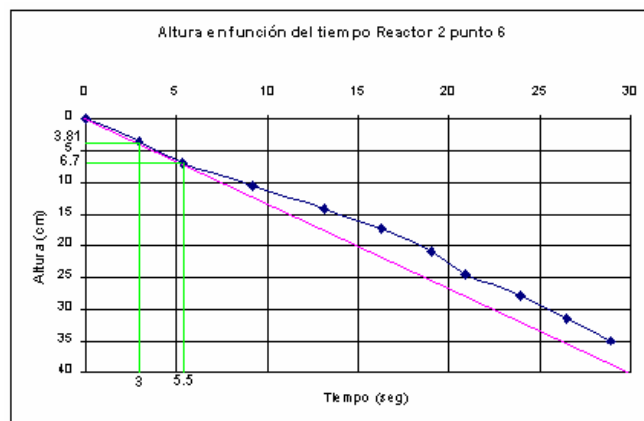


Figura N° 20.



Figura N° 21.

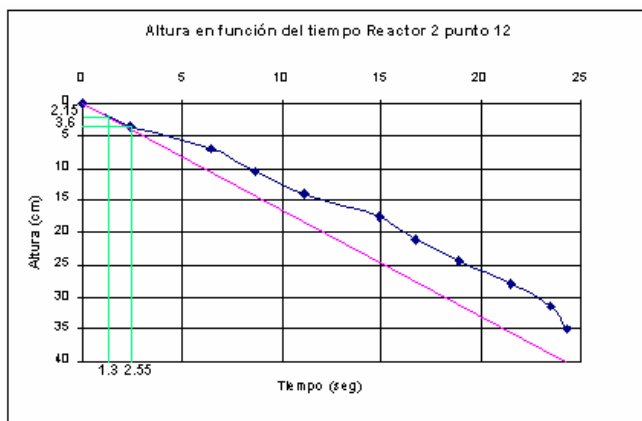


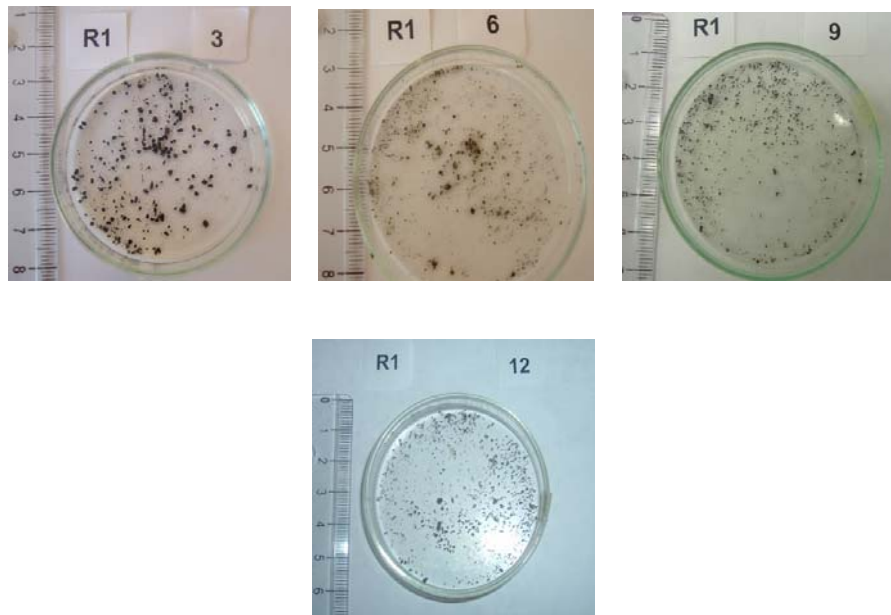
Tabla N° 3.

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DEL LODO ANAEROBIO (Ensayo semana 14)					
Reactor 1			Reactor 2		
Punto	Vel. Sed. (cm/s)	Vel. Sed. (m/h)	Punto	Vel. Sed. (cm/s)	Vel. Sed. (m/h)
3	2.2857	82.28	3	1.1739	42.26
6	1.5000	54.00	6	1.1560	41.62
9	1.2588	45.31	9	1.5340	55.19
12	1.7368	62.52	12	1.1600	41.76

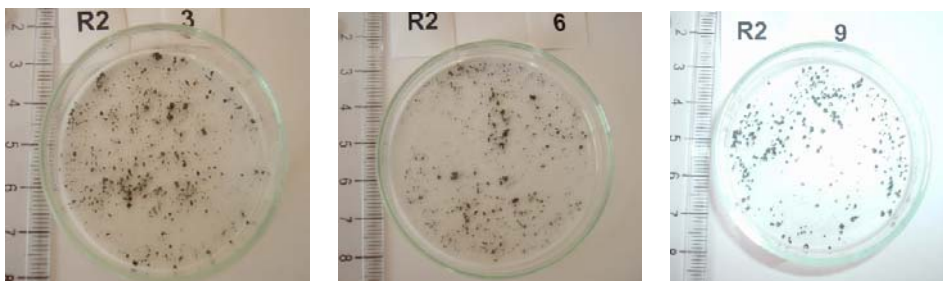
ANEXO 5: FORMA Y TAMAÑO DEL LODO

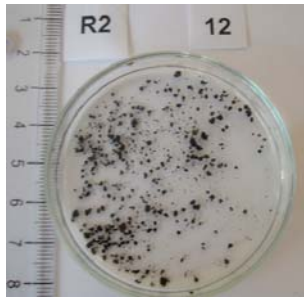
Semana 6. 22 Agosto 2005

Reactor UASB1



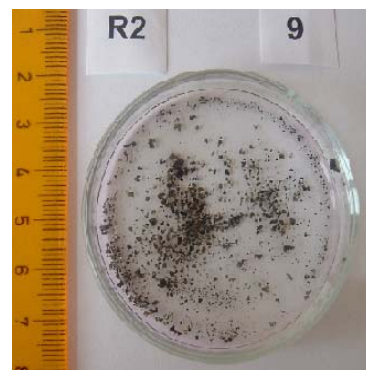
Reactor UASB 2

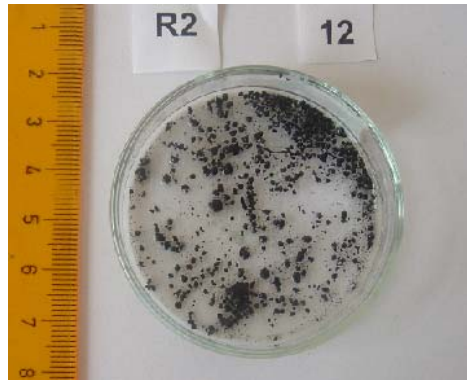




Semana 10. 19 Septiembre 2005

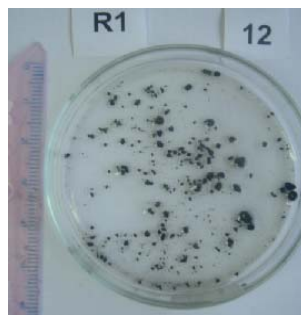
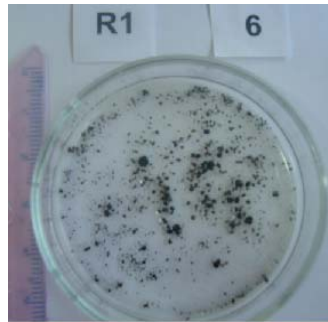
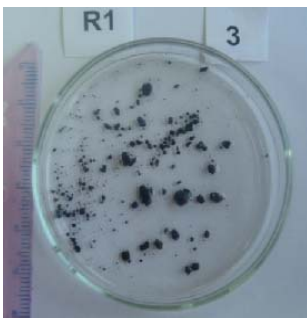
Reactor UASB 2.





Semana 14. 18 de octubre 2005

Reactor UASB 1.



Reactor UASB 2.

