

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA COMBINADO  
ANAEROBIO-AEROBIO A ESCALA DE LABORATORIO PARA EL  
MANEJO DE AGUAS RESIDUALES Y DEPURACIÓN DE LODO  
AEROBIO.**

**DANIEL EDUARDO BARÓN RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTADA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FLORIDABLANCA  
2012**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA COMBINADO  
ANAEROBIO-AEROBIO A ESCALA DE LABORATORIO PARA EL  
MANEJO DE AGUAS RESIDUALES Y DEPURACIÓN DE LODO  
AEROBIO.**

**DANIEL EDUARDO BARÓN RODRÍGUEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
INGENIERO AMBIENTAL**

**Director:  
M.Sc. ÁLVARO ANDRÉS CAJIGAS CERÓN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTADA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FLORIDABLANCA  
2012**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bucaramanga, Marzo 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, la cual siempre ha estado a mi lado en constante apoyo para definir mis logros y expectativas de vida.

A la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, a los docentes y amigos, los cuales influyeron durante el proceso académico para formarme como un profesional integral con valores ideales para la sociedad.

A Álvaro Andrés Cajigas, quien promovió mi interés por algunos temas de ingeniería ambiental, enseñándome a lo largo de mi carrera, valorando los proyectos de investigación como aportes para la sociedad.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. JUSTIFICACIÓN	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. MARCO REFERENCIAL	16
3.1 ANTECEDENTES	16
3.2 MARCO CONTEXTUAL	17
3.3 MARCO TEÓRICO	17
3.3.1 Características de las Aguas Residuales	17
3.3.2 Características Físicas	19
3.3.3 Características Químicas	20
3.3.4 Características Biológicas del Agua Residual	23
3.3.5 Tratamiento Biológico	23
3.4 MARCO LEGAL	31
4. METODOLOGÍA	33
4.1 FASE 1. Condiciones iniciales de montaje y operación en los reactores anaerobio-aerobio.	33
4.2 FASE 2. Proceso de depuración de la materia orgánica al recircular una fracción de lodo, mediante el sistema aerobio anaerobio.	36
4.3 FASE 3. Evaluación del acoplo a escala de laboratorio según el proceso anaerobio-aerobio y fracción porcentual optima de lodos en un sistema de recirculación.	38

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	29
5.1 Fracción depurada en el agua residual	41
5.2 Análisis físico-químico	46
5.3 Análisis microbiológico	48
5.4 Nitrógeno Total	50
6. CONCLUSIONES	52
7. RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXOS	59

## LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Contaminantes del agua residual.	18
Tabla 2. Definición de sólidos en el agua.	19
Tabla 3. Identificación de protozoos.	28
Tabla 4. Parámetros exigidos según el Decreto 1594 de 1984	32
Tabla 5. Parámetros exigidos en la Resolución de Octubre de 2010.	32
Tabla 6. Volumen de tanque de almacenamiento y reactores.	34
Tabla 7. Parámetros de medición.	35
Tabla 8. Cambios en la operación del sistema combinado.	36
Tabla 9. Porcentaje de remoción en condiciones sin recirculación.	39
Tabla 10. Registro de Temperatura y conductividad.	40
Tabla 11. Registro pH.	42
Tabla 12. Contenido de Bicarbonato y AGV en 50 ml de muestra.	47

## LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Reactor UASB.	25
Figura 2. Sistema de lodos activados completo.	27
Figura 3. Flóculos de un sistema de lodos activados.	27
Figura 4. Diagrama de predominio relativo.	29
Figura 5. Esquema de sistema anaerobio + aerobio.	30
Figura 6. Sistema combinado anaerobio-aerobio.	33
Figura 7. Bomba dosificadora.	34
Figura 8. Muestras del sistema combinado.	35
Figura 9. Reactor a escala UASB.	37
Figura 10. Sólidos sedimentables en la tolva1	37
Figura 11. Tanques de almacenamiento.	38
Figura 12. Porcentajes de Remoción en la Etapa1 y Etapa2.	41
Figura 13. Remoción por DQO en la Etapa1 y Etapa2.	43
Figura 14. Índice de Carga en el reactor UASB.	44
Figura 15. Porcentaje de materia orgánica en los ST.	45
Figura 16. Índice volumetrico de lodo (IVL).	45
Figura 17. Seguimiento de AI/AP en el sistema UASB.	46
Figura 18. Oxígeno disuelto adquirido en el sistema aerobio.	47
Figura 19. Floc Flotante.	48
Figura 20. Muestra microbiológica de licor mixto en etapa 1-(40x).	49

Figura 21. Muestra microbiológica del licor mixto en etapa 2-(40x).	49
Figura 22. Cantidad de nitrógeno Kjeldhal en E1 y E2.	50

## LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo 1. Esquema sistema aerobio, licor mixto + clarificador.	34
Anexo 2. Ecuaciones de TRH.	36
Anexo 3. condiciones iniciales d <sub>qo</sub> .	39
Anexo 4. Datos consignados de Temperatura, pH y Conductividad.	40
Anexo 5. Datos puntuales de remoción de materia organica en mg/L.	41
Anexo 6. Resultados de DQO.	43
Anexo 7. Datos consignados de ST, SVT y SFT.	44
Anexo 8. Índice volumetrico de lodo.	45
Anexo 9. Alcalinidad en relación a Al/AP.	46
Anexo 10. Datos de oxígeno disuelto.	47
Anexo 11. Analisis microbiologico.	48
Anexo 12. Contenido de nitrógeno Total.	50

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA COMBINADO ANAEROBIO-AEROBIO A ESCALA DE LABORATORIO PARA EL MANEJO DE AGUAS RESIDUALES Y DEPURACIÓN DE LODO AEROBIO.

**AUTOR (ES):** DANIEL EDUARDO BARÓN RODRÍGUEZ

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR (A):** ÁLVARO ANDRÉS CAJIGAS CERÓN

### RESUMEN

El incremento continuo del caudal y la reducida capacidad de remoción del sistema secundario en la Universidad Pontificia Bolivariana - seccional Bucaramanga, hacen necesaria la búsqueda de alternativas para continuar cumpliendo con la normatividad actual, dentro de las soluciones aplicables por la institución, la opción de un sistema de tratamiento aerobio es una buena alternativa. En este estudio se evaluó la posibilidad de implementar un sistema aerobio para la depuración del agua residual como pulimiento del trabajo realizado por el reactor anaerobio. Adicionalmente se evaluó recomendaciones de estudios previos, donde se sugirió adicionar una fuente de carbono para mejorar la relación óptima con el nitrógeno y el fósforo para afluente del reactor anaerobio. El sistema propuesto constó de un reactor UASB seguido de un reactor de lodos activados con mezcla completa. La recirculación de lodo aerobio en el reactor anaerobio permitió un mejoramiento en el desempeño del reactor anaerobio pasando de remociones del orden del 60 % al 80%. El sistema total logró remociones de sólidos, nitrógeno total y MO (Depuración: 91% de MO, 83,04% de sólidos y 46,63% de nitrógeno total).

**PALABRAS CLAVES:** Combinación de tratamiento anaerobio y aerobio, depuración de lodos aerobios en reactores UASB, Fuente de carbono.

## **SUMMARY**

**TITLE:** COMBINED ANAEROBIC/AEROBIC LABORATORY SCALE SYSTEM BEHAVIOR STUDY OF WASTERWATER AND AEROBIC SLUDGE TREATMENT

**AUTHOR(S):** DANIEL EDUARDO BARÓN RODRÍGUEZ

**FACULTY:** Environmental Engineering

**ADVISOR:** ÁLVARO ANDRÉS CAJIGAS CERÓN

## **ABSTRACT**

The continuous increase of flow and reduced clearance capacity of the secondary system at the Universidad Pontificia Bolivariana - Bucaramanga, requires finding alternatives to remain in compliance with current regulations, applicable solutions within the institution, the choice of an aerobic treatment system is a good alternative. In this study we evaluated the chances of implementing an aerobic system for wastewater purification and polishing of the work done by the anaerobic reactor. Additionally, previous studies evaluated recommendations, which suggested adding a carbon source to enhance optimal relationship with the nitrogen and phosphorus to the anaerobic reactor effluent. The proposed system consist of a UASB reactor followed by an activated sludge with thorough mixing. The aerobic sludge recirculation in the anaerobic reactor allowed an improvement in the performance of the anaerobic reactor removals passing the order of 60% to 80%. The total system managed solids removal, total nitrogen and MO (clearance: 91% of MO, 83.04% solids and 46.63% of total nitrogen).

**KEYWORDS:** Combination of anaerobic and aerobic treatment, aerobic sludge treatment in UASB reactors, carbon source.

## INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales domesticas se caracteriza por su alto contenido de materia orgánica, lo cual hace que el recurso hídrico tenga condiciones adversas para el ambiente al realizar vertimientos directos en fuentes hídricas. Sin embargo, al paso del tiempo, las civilizaciones han realizado tratamientos biológicos aptos para la remoción de aguas contaminadas, donde los procesos anaerobios y aerobios son los encargados de metabolizar la materia orgánica y algunos compuestos químicos por su alto rendimiento para depurarla.

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga actualmente tiene un tratamiento anaerobio de flujo pisto, el cual es deficiente en la depuración de materia orgánica y nitrógeno total según los requerimientos que establece el Decreto 1594 de 1984 para usuarios nuevos. Por tanto, es necesaria acoplar un sistema capaz de mejorar la productividad en las remociones de agua residual.

El presente trabajo tiene como fin realizar un sistema anaerobio-aerobio con recirculación de lodo aerobio a escala de laboratorio para verificar la eficiencia en las remociones de materia orgánica y nitrógeno total en las aguas residuales provenientes de la UPB-seccional Bucaramanga. No obstante es necesario en inicio operar el sistema sin recirculación de lodo aerobio para determinar el rendimiento del tratamiento.

Para llevar a cabo la verificación del tratamiento combinado, fue requerida la implementación de un sistema anaerobio UASB y un sistema aerobio de lodos activado. Donde la toma de datos físico-químicos y biólogos, aportan en torno a la valoración de un riguroso seguimiento del sistema, tanto en los procesos metabólicos de los microorganismos como en el cumplimiento de la normativa Colombiana del vertimiento en aguas domesticas hacia fuentes hídricas. No obstante el tratamiento cuenta con un sistema de recirculación de lodo aerobio, dado que el sistema puede soportar altas cargas de materia orgánica.

Para lograr la simulación del sistema combinado, fue necesario el apoyo de la UPB-seccional Bucaramanga, la cual aportó sus instalaciones para realizar el acoplo del sistema y también los análisis físico-químicos y biológicos para la valoración de su eficiencia.

## 1. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, la mayoría de construcciones de plantas de tratamiento de aguas residuales, están compuestas a base de un sistema secundario definido como aerobio o anaerobio, el cual se encarga de remover la materia orgánica existente en el flujo residual. Sin embargo, a lo largo del siglo XXI se han realizado proyectos en la implementación de sistemas combinados (Arrojo1 et. al, 2002), a fin de aumentar la eficiencia en las remociones de compuestos orgánicos e inorgánicos, como también la reducción en el área de implementación de reactores y sus costos de mantenimiento.

El sistema anaerobio-aerobio con recirculación, permite garantizar condiciones eficientes en la remoción de materia orgánica presentes en las aguas residuales en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, dado que el presente tratamiento anaerobio, es ineficiente debido a la baja remoción de carga contaminante, con respecto a la materia orgánica y nitrógeno total. De tal manera que es necesario implementar un tratamiento combinado a escala de laboratorio, con el fin de verificar el rendimiento de los dos reactores en secuencia con una fracción de lodo aerobio recirculado al tanque de almacenamiento de aguas residuales.

La caracterización del sistema a escala de laboratorio durante dos etapas de estudio, ofrece a la UPB – seccional Bucaramanga la valoración de los procesos físico-químicos y biológicos del agua residual removida, lo que define el rendimiento en caso tal que sea inicio para nuevos estudios o la implantación del sistema. No obstante, la valoración del rendimiento esta relacionado con el cumplimiento establecido por las normas ambientales presentes en Colombia.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL:**

Verificar el comportamiento del sistema combinado (anaerobio-aerobio) a escala de laboratorio para el manejo de las aguas residuales de la UPB-seccional Bucaramanga y la depuración de una fracción del lodo aerobio generado en el reactor anaerobio.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

Establecer las condiciones iniciales de operación del sistema aerobio (Lodos activados sin recirculación) y anaerobio (UASB).

Determinar la capacidad de asimilación del reactor UASB para el tratamiento de una fracción del lodo aerobio producido en el reactor de lodos activados.

Verificar el comportamiento del nitrógeno en el sistema UASB-LODOS ACTIVADOS en diferentes porcentajes de recirculación del lodo aerobio.

### 3. Marco Referencial

#### 3.1 Antecedentes

Los sistemas de tratamiento biológicos de agua residual utilizados actualmente están siendo modificados, debido al alto incremento de las descargas municipales e industriales. Esto conlleva a crear nuevos procesos eficaces para la reducción o recuperación del ambiente (*R.S.Ramalho, 2003*).

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga cuenta con una planta de aguas residuales de tratamiento biológico anaerobio de flujo pistón (RAP), donde el proceso de depuración del agua continúa en un tratamiento acuático (*Osorio Duarte, 2010*). La integración de estos dos sistemas proporciona un aumento en la eficiencia al remover nitrógeno amoniacal, coliformes totales, coliformes fecales y fósforo total, evitando un impacto severo en la fuente receptora. No obstante, las remociones caracterizadas de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR), en promedio oscilan entre 42,96% y 78,96% en DQO y DBO<sub>5</sub>, incumpliendo con el Decreto 1594 de 1984 (*Pérez Lizarazo, 2011*).

El tratamiento anaerobio-aerobio en aguas residuales esta siendo aceptado en America latina debido a su alta capacidad de remoción de materia orgánica. Esto se debe al aumento del tiempo de retención hidráulico en el reactor aerobio (lodos activados), como también en el reactor anaerobio de flujo ascendente de manto de lodo (UASB), el cual permiten un aumento en la exposición de biomasa concluyendo en una mayor descontaminación del agua residual inicial (*Rosa C. Bermúdez, 2003*), (*A. C. van Haandel, et al 2011*).

Las investigaciones de reactores acoplados, conlleva a la implementación de un tratamiento anaerobio-aerobio con recirculación de lodo aerobio a escala de laboratorio, utilizando el agua residual proveniente de la PTAR – UPB seccional Bucaramanga, donde es reducida la cantidad de sólidos, nitrógeno amoniacal, materia orgánica y de igual manera la posibilidad de estabilizar las condiciones del efluente para tener condiciones físico – químicas favorables en la fuente receptora (*B. Arrojo1, 2002*).

Este método busca la adecuación y optimización de la planta de aguas residuales de la UPB - seccional Bucaramanga, promoviendo cambios eficientes en los procesos de retención hidráulica y recirculación de lodos, para garantizar las remociones teóricas y experimentales.

## **3.2 Marco contextual**

La Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con un sistema de tratamiento de agua residual anaerobio. Fue creado y llevado a funcionamiento hace más de 16 años. Consta de un tratamiento preliminar para remover el material sólido, grasas. Un tratamiento secundario de dos reactores anaerobio flujo pisto (RAP) con un tiempo de retención hidráulico de 9 horas. Estos reactores son los encargados de tratar todas las aguas residuales provenientes de la institución.

Actualmente se emplea un tratamiento terciario biológico para aumentar las remociones de nitrógeno amoniacal, sólidos totales, coliformes fecales, entre otros mediante canales rectangulares con caídas de agua, donde se aprovecha la transferencia de oxígeno para posteriormente mejorar las condiciones hidráulicas en el efluente (Pérez Lizarazo, 2011).

## **3.3 MARCO TEÓRICO**

### **3.3.1 Características de las Aguas Residuales**

En la mayoría de casos el agua residual varía sus características según su origen y la magnitud del caudal aportante, lo cual ocasiona que las cargas contribuyentes per capita varíen en dependencia a la localidad existente. No obstante es importante definir algunos parámetros fundamentales del manejo adecuado de las aguas domesticas, donde los sólidos suspendidos, productos biodegradables y organismos patógenos predominan en el recurso hídrico y de igual manera los procesos químicos, físicos y biológicos debido a su importancia en el control y seguimiento en la descontaminación del agua (Romero Rojas, 1999).

La contaminación del agua pone en peligro la salud pública, debido a sus componentes tóxicos en altas concentraciones (fósforo, nitrógeno, materia orgánica y coliformes), complica y encarece los abastecimientos de agua a poblaciones (Orozco Jaramillo, 2005), (Raquel G. Guerra et. al, 2000). Por lo cual es aconsejable realizar muestreos para identificar en principio, causas, efectos, controles y modelación de la depuración del afluente al efluente y sus efectos al ser vertida a una fuente externa. Para ello, existen tres temas representativos según von Sperling & Lemos Chernicharo, 2006.

- Contaminación por materia orgánica. (consumo de oxígeno disuelto)
- Contaminación por microorganismos patogenos. (extinción de bacterias)
- Contaminación de los lagos y embalses (eutrofización, causada por el nitrógeno y fósforo).

Los tratamientos de aguas residuales son esenciales para evitar impactos severos en los cuerpos receptores y a todos aquellos que influya en sus descargas. En la tabla 1 se describe cada uno de los contaminantes más importantes del manejo de aguas residuales, sus parámetros de medición y sus impactos ambientales (Romero Rojas, 1999).

**Tabla 1.** Contaminantes del agua residual.

<b>Contaminantes</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Parámetros de medición</b>
<b>Materia orgánica biodegradable</b>	Reducción de oxígeno en el agua. Generación de olores no deseables.	DBO, DQO.
<b>Amoniaco</b>	Desoxigena el agua. Tóxico para organismos acuáticos. Estimular el crecimiento de algas.	$\text{NH}_4^+$ - N
<b>Materia suspendida</b>	Turbiedad en el agua. Acumulación de lodos.	SST, SSV.
<b>Fósforo</b>	Estimulación en el crecimiento de algas.	Ortofosfato
<b>Energía térmica</b>	Reducción en la concentración de saturación de oxígeno en el agua. Aceleración en el crecimiento de organismos acuáticos.	Temperatura
<b>Iones hidrógeno</b>	Riesgo potencial para los organismos.	pH

Fuente: Romero Rojas, 1999.

Mediante un programa de muestreo en las aguas residuales, es posible identificar y clasificar las propiedades del agua siguiendo los métodos estándar (Romero Rojas, 1999). Según Crites & Tchobanoglous (2000), el muestreo es aceptado cuando se asegura que los datos tomados tengan las siguientes características:

- Representativos: La cantidad de datos tomados demuestran el proceso realizado durante la investigación.
- Reproducibles: Los datos obtenidos pueden ser reproducidos por otras investigaciones por medio del mismo método de muestreo y protocolos analíticos.
- Sustentados: La documentación debe estar disponible para validar el plan de muestreo.
- Útiles: Los datos obtenidos permitir el cumplimiento de los objetivos del plan de monitoreo.

### 3.3.2 Características Físicas

El agua residual domestica porta gran cantidad de material sólido, el cual esta compuesto por materia sedimentables, materia coloidal, materia en suspensión y materia disuelta. Esta composición física es la encargada de atribuir al agua condiciones inapropiadas por la concentración en la carga expuesta a un efluente, el cual en la mayoría de casos la fuente receptora no tiene el suficiente caudal para diluir el flujo continuo de agua residual, incluso las características físicas como la temperatura y conductividad también alteran la composición del agua (Metcalf & Eddy, 1996).

En los flujos de agua residual domestica se presenta materia orgánica suspendida y/o disuelta, lo cual pueden afectar a la calidad del efluente al producir reacciones desfavorables para el medio ambiente y el consumidor de transito (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition). A causa de las condiciones nocivas en las características de la fuente hídrica, se ha propuesto un límite inferior a 500 mg/L de sólido disuelto y 200 mg/L de sólidos suspendidos (MAVDT, 2010).

La tabla 2 clasifica y define los sólidos según la prueba que se realice para identificar el contenido de material portante en la muestra obtenida.

**Tabla 2.** Definición de sólidos en el agua.

Prueba	Descripción
<b>Sólidos volátiles totales (SVT)</b>	Pueden volatilizarse e incinerarse cuando ST son calcinados a $(500 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C})$
<b>Sólido totales (ST)</b>	Residuo remanente después de evaporación a $(103 \text{ a } 105 \text{ }^\circ\text{C})$ .
<b>Sólidos fijos totales (SFT)</b>	Residuo que permanece después de incinerar los sólidos totales $(500 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C})$
<b>Sólidos suspendidos volátiles (SSV)</b>	Sólidos volatilizados e incinerados a $(500 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C})$
<b>Sólidos sedimentables</b>	Sólidos suspendidos, expresados en mililitros por litros. Sedimentados en un periodo de tiempo específico.

Fuente: CRITES & TCHOBANOGLIOUS, 2000.

Se identifican los sólidos sedimentables con el fin de establecer el diseño óptimo del clarificador en un sistema de lodos activados y controlar su eficiencia; de igual manera se identifican los sólidos volátiles en la muestra por medio de la incineración a  $500 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , cuantificando la oxidación por la formación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Romero Rojas, 1996); los sólidos totales y volátiles definen indirectamente la cantidad de biomasa y microorganismos presente en el lodo. En algunos casos los sólidos se deben afianzar con el Índice Volumétrico de Lodo (IVL), el cual indica el porcentaje de sedimentación del

lodo, promoviendo parámetros específicos en el control de operación del sistema de lodos activados (*Cajigas, Torres, Rodriguez, & Rueda Saa, 2001*). Sin embargo el IVL, hace referencia al volumen específico del lodo, tomando como referencia valores que estén entre 40 y 140 mL/g (*Carlini & Walz, 2003*). Este valor varía según las concentraciones del lodo que se manejen en el tanque de aireación, cuantificando la sedimentabilidad del clarificador (*Ramalho, 1996*), (*Pérez Lizarazo, 2011*).

Hallar la conductividad en una muestra de agua residual permite identificar la presencia y tipo de iones en su concentración total, donde la temperatura y la alcalinidad repercuten directamente el valor de la muestra. Es por ello que la conductividad está ligada a cualquier cambio en la cantidad de sustancia disuelta dada por el afluente existente, como también es posible valorar un, estimativo del contenido de la sólido disuelto (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition, 2510 CONDUCTIVITY*).

Por lo general el agua residual mantiene temperaturas más elevadas que el agua cruda, debido a la generación de energía por la degradación de materia orgánica mediante los procesos metabólicos de los microorganismos. Esta es por ellos que la temperatura siempre está presente en los tratamientos de agua residual que involucran los procesos biológicos, dado que una aclimatación óptima permita la existencia de vida acuática, favorece las reacciones químicas, velocidad de reacción, crecimiento y adaptación de la población microbiana. En zonas tropicales la temperatura no varía debido a la inexistencia de estaciones, proporcionando ahorro de energía para mantener el sistema de agua residual en un ambiente idóneo (*Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones., 2000*), (*R. A. Pandey et. al, 1991*).

### **3.3.3 Características Químicas**

La química del agua residual está dividida en su mayor parte como orgánicas e inorgánicas. Los compuestos orgánicos se basan en los residuos provenientes de desechos de organismos vivos, pero existen gran variedad de compuestos, los cuales son difíciles de distinguir en forma separada, sin embargo son importantes para realizar cualquier tratamiento de aguas residuales. Por otra parte, los compuestos orgánicos más abundantes en aguas residuales domésticas son aceites, carbohidratos, grasas, proteínas y también en algunas ocasiones gran número de moléculas orgánicas sintéticas (*Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, 2000*).

A diferencia, los compuestos inorgánicos existen en una amplia variedad de elementos individuales y acoplados. El nitrógeno se encuentra de la forma nitratos (NO<sub>3</sub>), nitritos (NO<sub>2</sub>), nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) y nitrógeno

orgánico. Todas estas formas son bioquímicamente interconvertibles, la cual hace parte del ciclo del nitrógeno.

La determinación acoplada de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal es referida como nitrógeno total Kjeldahl (NTK). El nitrógeno orgánico presenta material natural tales como: péptidos, proteínas, ácido nucleicos, urea y material orgánico sintético. En cuanto a el nitrógeno amoniacal se encuentra en concentraciones promedio de 10 mg/L a 25 mg/L en el afluente de aguas residuales domesticas. No obstante algunos sistemas de tratamiento como lo es el UASB o lodos activados permiten remover una fracción del compuesto. El tratamiento debe ser monitoreado con el fin de evitar el aumento en la concentración de nitrógeno amoniacal superiores a 1600 mg/L y por efecto la inhiben los procesos microbiológicos, lo cual reduce la eficiencia del sistema (Romero Rojas, 1996).

El nitrógeno oxidado total es la suma de nitritos y nitratos. Los nitritos en su gran mayoría se producen en aguas superficiales, siendo la oxidación intermedia de nitrógeno (oxidación del amonio a nitrato y reducción del nitrato). Existen límites permisibles de 10 mg/L que advierten la prevención de trastornos corporales en el hombre por su alta toxicidad. Por otra parte el nitrato se encuentra en pequeñas cantidades en las aguas domésticas, como también en tratamientos biológicos nitrificantes donde se puede encontrar en concentraciones de hasta 30 mg/L de nitratos. La presencia o ausencia de este nutriente puede ser limitante de crecimiento microbiológico en el agua (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition, 4500-N NITROGEN).

Existen algunos parámetros químicos que se deben tener en cuenta en la caracterización y seguimiento de los tratamientos de aguas residuales.

**pH:** Se define como la concentración de ion hidrógeno en una solución y esta íntimamente relacionada con la reacción de disociación en la moléculas de agua. Esta descomposición forma iones hidroxilo e hidrogeno.

La mayor parte de la vida orgánica permanece en pH entre 5 y 9 unidades, permitiendo que los organismos puedan realizar sus procesos metabólicos correctamente. En el caso de las aguas residuales, un pH menor a 5 y superior a 9 unidades es difícilmente tratada mediante procesos biológicos. Debido a este problema el pH debe ser ajustado antes de ser vertido a condiciones permisibles para la vida biológica; ya que puede causar complicaciones en fuentes receptoras si no se cumple con esta condición (Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, 2000).

**Alcalinidad:** La alcalinidad de un agua es la capacidad de neutralizar el ácido, y su principal propósito es indicar concentraciones de carbonatos, bicarbonatos, ácidos grasos volátiles y hidróxidos. Los valores pueden incluir las contribuciones de boratos, fosfatos, silicatos u otras bases. De igual

manera su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir cambios radicales de pH, permite realizar procesos de tratamiento químico siendo eficientes en la remoción de amoníaco y nutrientes (Romero Rojas, 1996), (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition, 2320 ALKALINITY).

En la mayoría de casos las aguas residuales domesticas tiene un contenido de alcalinidad poco mayor que las aguas de suministro, las concentraciones generalmente son de 50 - 200 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . En tratamientos anaerobios es muy comun el desenso de la alcalinidad debido a la produccion de gases acidificados, lo cual puede generar problemas en el efluente, en ocasiones es ideal adicionar bicarbonato de sodio, esto causa el aumento y estabilizacion del sistema por medio del efecto buffer (Romero Rojas, 1996), (Cajigas Ceron et. al, 2005).

**Oxígeno Disuelto:** En los tratamientos de agua residual domestica se debe realizar mediciones de oxígeno disuelto (OD), con el fin de garantizar las condiciones optimas para los microorganismos, en algunas ocasiones la temperatura, presión atmosférica y salinidad del agua, repercute directamente la saturación de moléculas de oxígeno en el tratamiento aerobio y al existir bajas cantidades de OD, limita la capacidad de auto purificación en el cuerpo de agua. La caracterización de las muestras se puede realizar por los métodos de Winkler y/o electrométrico (utilizando electrodos de membrana) (Romero Rojas, 1999).

Al realizar un tratamiento biológico aerobio es importante determinar el suministro de oxígeno y las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua por medio del diseño, operación y evaluación de la planta de tratamiento de agua residual. La cantidad de oxígeno que se transfiere a un tanque de aireación de lodos activados en agua residual, debe ser suficiente para completar la demanda de masa microbiana existente en el sistema de tratamiento y para mantener un residual de oxígeno disuelto generalmente del orden de 2 mg/L (Romero Rojas, 1999).

En un tratamiento de licor mixto con sedimentador, el oxígeno disuelto colabora en la depuración de compuestos orgánicos e inorgánicos, donde las partículas residuales como el nitrógeno amoniacal y la materia orgánica son oxidadas y removidas a fin de mejorar las condiciones al efluente. (B. Arrojo1 et. al, 2002).

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Para determinar los porcentajes, índice de carga y cantidad de remoción de materia orgánica en una muestra de agua residual, donde la obtención de estos datos permite evidenciar el estado del sistema aerobio y/o anaerobio, garantizando el rendimiento del tratamiento a través del tiempo.

Se a establecido un método el cual oxida las partículas orgánicas e inorgánicas, sin embargo en la mayoría de casos es utilizada para determinar únicamente la materia orgánica cuando se requiere adquirir una muestra de aguas residual de origen domestico. Las aguas residuales domésticas tienen en promedio un DQO de 250 a 1000 mg/L y la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación química es mayor que la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación biológica (Romero Rojas, 1999). La oxidación se lleva a cabo en condiciones controladas, donde el oxidante consumido (dicromato de potasio), se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition, 5220 CHEMICAL OXYGEN DEMAND).

### **3.3.4 Características Biológicas del Agua Residual**

Los principales organismos encontrados en las aguas residuales domesticas son microorganismos. Estos seres vivos se encargan de realizar actividades esenciales para el ambiente como captar energía solar y llevar a cabo las etapas de los ciclos del carbono, oxígeno, nitrógeno entre otros elementos indispensables para la biota, sin embargo en algunos casos se encuentran microorganismos que pueden vivir en condiciones en ausencia de oxígeno. Estas características permiten utilizar los microorganismos como indicadores de contaminación y ejecutores de tratamientos biológicos (Romero Rojas, 1999), (Rodríguez, Jenny Alexandra)

### **3.3.5 Tratamiento Biológico**

La depuración biológica en aguas residuales se fundamenta en un proceso físico - biológico, tomando como referencia la biofloculación o bioadsorción, y siendo un aspecto exclusivamente biológico, el metabolismo bacteriano según Di Marzio, W. D. (2004). La aplicación de este tipo de tratamiento conlleva la remoción de contaminantes mediante actividad biológica. En todo proceso biológico los microorganismos se desarrollan de manera apropiada si se les mantiene en condiciones ideales, el abastecimiento consecuente de nutrientes y la ausencia de compuestos tóxicos es fundamental para dicho desarrollo (Romero Rojas, 1999).

Los principales objetivos del tratamiento biológico del agua residual son la coagulación, la eliminación de sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En aguas residuales domésticas, el objetivo principal es la reducción de la materia orgánica presente y en la mayoría de los casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y fósforo que puedan resultar tóxicos y la estabilización de lodos.

Por esta razón se debe tener en cuenta todos los procesos biológicos que se emplean en el tratamiento de aguas residuales, estos tienen su origen en

fenómenos y procesos que se producen en la naturaleza. La descomposición de los residuos se puede acelerar por medio del control del ambiente y el entorno de los microorganismos. El proceso de tratamiento biológico se basa en el control del medio de los microorganismos, de modo que se obtenga las condiciones de crecimiento óptimas (Metcalf & Eddy, Inc, 1996).

**Oxidación Biológica:** En las aguas residuales existe gran cantidad de biodiversidad microbiana, que en ausencia o presencia de oxígeno degradan la materia orgánica e inorgánica en compuestos inorgánicos altamente oxidado, como dióxido de carbono, agua, nitrógeno amoniacal, sulfatos, metano, entre otros. Este proceso es también conocido como mineralización o descomposición microbiológica (Romero Rojas, 2002).

**Proceso Aerobio:** Este proceso se fundamenta en la respiración de oxígeno libre ( $O_2$ ), el cual organismos biológicos como lo son las bacterias y protozoos lo toman para metabolizar su alimento y posteriormente reducir la materia orgánica en: (agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), residuos celular interne y fracción no biodegradable) (Romero Rojas, 2002).

Por esta razón usualmente las bacterias y los protozoos son los organismos vivos más utilizados e importantes en el tratamiento aerobio de las aguas residuales, estos organismos son capaces de formar una capa floculenta gelatinosa con características ideales para mantener la remoción de la materia orgánica, tanto en los procesos de lodos activados como en filtros percoladores. (Romero Rojas, 2002), (B. Arrojo1 et. al, 2002)

**Proceso Anaerobio:** Es la descomposición u oxidación de materia orgánica por medio de microorganismos, los cuales metabolizan su alimento en ausencia de oxígeno libre, produciendo tres componentes fundamentales: biomasa, compuestos orgánicos y compuestos volátiles. A diferencia del proceso aerobio, el anaerobio genera menor cantidad de biomasa debido a menor eficiencia al producir energía, puesto que esta energía permanece en los productos finales reducidos como lo es el metano ( $CH_4$ ) (Romero Rojas, 2002), (Lemos Chernicharo, 2006).

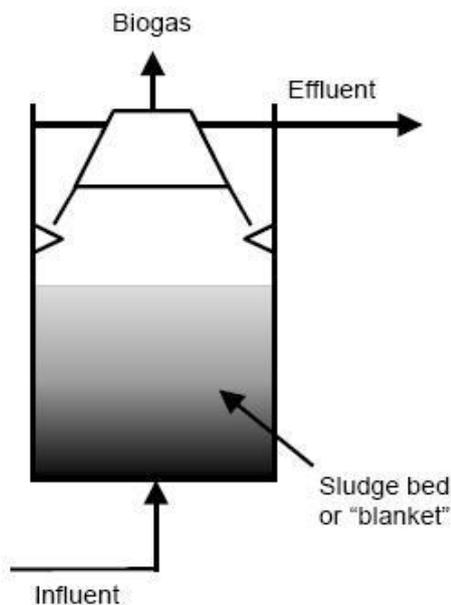
Un proceso anaeróbico ocurre cuando existe la descomposición del material orgánico residual, por medio de un proceso de desnitrificación de nitratos, respiración de sulfatos, hidrólisis-fermentación acetogénica y metanogénicas (Romero Rojas, 2002).

En la actualidad existen cuatro grupos principales de procesos biológicos: procesos aerobios, anóxicos, anaerobios y combinados. Dentro de cada proceso existe, además, diferentes tipos de técnicas como dependencia, proceso es de crecimiento biológico suspendido, crecimiento biológico adherido o una combinación (Romero Rojas, 1999).

**Tratamiento con Sistema UASB:** El reactor flujo ascendente y manto de lodos anaerobio (UASB), es un proceso en el cual el agua residual se introduce por la parte inferior del reactor y fluye a través de un manto de lodo conformado por granos biológicos. Este proceso se aplicó en principio para tratar las aguas residuales provenientes de procesos agrícolas como las azúcares residuales de la remolacha (Figura 1) (Romero Rojas, 2002).

El tratamiento se efectúa por contacto del agua residual con el lodo granulado o floculento, desarrollando bacterias con buenas características de sedimentación, las concentraciones presentes de SSV en el manto de lodo puede alcanzar los 100g/L y donde el gas producido por el proceso metabólico de bacterias anaerobias se mezcla generando circulación en el interior de la columna del reactor. Mediante la digestión de organismos anaerobios, se adhieren los gases a los granos o partículas biológicas, causando circulación interna para promover la formación de más granos en el reactor (Romero Rojas, 2002), (Lemos Chernicharo, 2006).

**Figura 1.** Reactor UASB



Fuente: Lucas Seghezzeo, 2004

Una de las principales ventajas de la utilización del reactor UASB es su capacidad para retener una alta cantidad de biomasa, proporciona una edad de los lodos mucho más largo que el tiempo de retención hidráulica (TRH). El tipo de biomasa que se desarrolla en el sistema son por lo general altamente sedimentables según (Lettinga et al, 1980). Otras ventajas señaladas del proceso se incluyen construcción sencilla, requerimiento de área bajas, operación simple, no necesita energía, el gas puede utilizarse, produce poco lodo y la eficiencia en remoción de DBO y SS es aceptable, con tiempos de

retención hidráulicos mayores de seis horas, no necesita mezcla artificial ni tanque independiente de sedimentación (Romero Rojas, 2002).

En la actualidad el reactor UASB ha sido estudiado según (Romero Rojas, 2002), llegando a obtener resultados como:

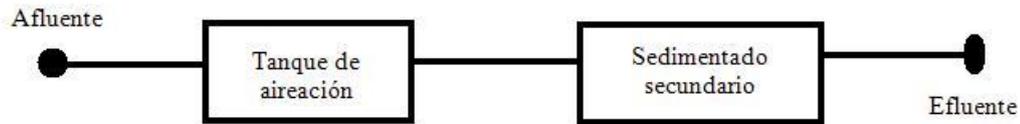
- La planta no requiere siembra para su arranque.
- Remoción de patógenos en 50%.
- La formación de agregados permite en el USAB haya concentraciones de biomasa altas de 25 g a 50g ssv sobre litro.
- Único proceso anaerobio que reduce nitrógeno.

**Tratamiento con Sistema de Lodos Activados:** El principio del funcionamiento en un tratamiento con sistema de lodos activados se manifiesta de la siguiente manera: Las aguas residuales domésticas crudas fluyen en el tanque de aireación con su contenido de materia orgánica como suministro alimenticio. Las bacterias metabolizan los residuos produciendo nuevas bacterias y dióxido de carbono, mediante el oxígeno disuelto proveniente de la aireación. Los protozoos obtienen energía por medio de bacterias y reproducirse. Una porción del crecimiento bacterial muere, liberando su contenido celular en la solución para una nueva síntesis en células microbiales (Romero Rojas, 1999). La aireación suministrar al cultivo microbiano el oxígeno requerido para el desarrollo de los procesos bioquímicos para una óptima degradación de la materia orgánica (Carpes, 2009).

La aplicación más frecuente que se utiliza para el crecimiento biológico en suspensión es el sistema de lodos activados, el cual promueve la suspensión de una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos, estas características hacen una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, es por ellos que recibe su nombre de activado. El resultado final es: materia orgánica susceptible de descomposición biológica, compuestos inorgánicos y lodo activado adicional (Davis & Masten, 2005).

La sedimentación de los sólidos (biomasa) o clarificador del efluente (Figura 2), ocurre en el tanque de sedimentación secundario. La biomasa es separada generando flóculos sedimentables. Este procesos se lleva a cabo mediante la generación de una matriz gelatinosa, la cual adhieren bacterias, protozoos y otros microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica (Figura 3); los flóculos formados por materia gelatinosa facilitan la sedimentación debido a su peso (Speriling & Lemos Chernicharo, 2005).

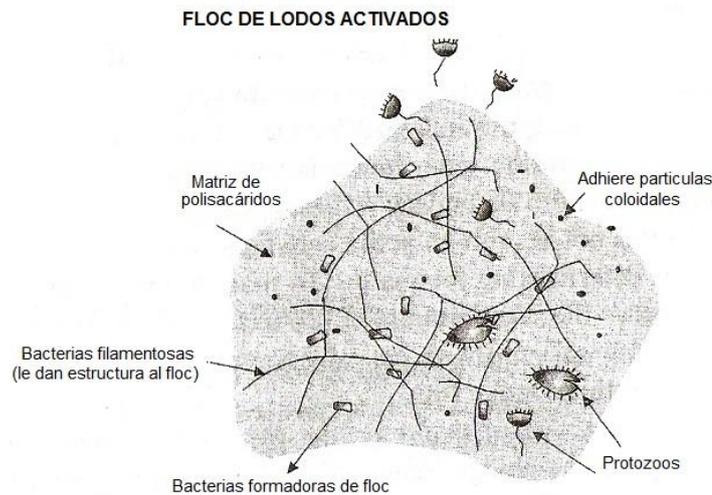
**Figura 2.** sistema de lodos activados completo



Fuente: Autor

El sistema de lodos activados es estrictamente aerobio. Se provee mezcla completa y continua en el tanque de aireación, mediante aireación mecánica o por difusores, buscando minimizar los desequilibrios biológicos, causados por amplias variaciones horarias en la carga orgánica o hidráulica, en efluente de pequeñas comunidades (Romero Rojas, 2002). El sistema de lodos activados es usado cuando se requiere un efluente de alta calidad (Speriling & Lemos Chernicharo, 2005).

**Figura 3.** Flóculos de un sistema de lodos activados.



Autor: Speriling & Lemos Chernicharo, 2005

**Microbiologías del Sistema de Lodos Activados:** En este sistema se encuentran microorganismos los cuales son bioindicadores del estado y edad del lodo, determinando condiciones de operación del reactor. Estos microorganismos son tomados y chequeados periódicamente por medio de observación microscópica del lodo y los resultados son contrastados con los resultados físico-químicos (Vilaseca V, 2001).

En los sistemas de lodos activados, los principales microorganismos en el tanque de aireación son protozoos, bacterias y metazoos. La identificación se debe tener presente:

**Bacterias:** Son la población de organismos con predominio en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, sus diferentes actividades bioquímicas pueden metabolizar gran parte de los compuestos orgánicos presentes en el agua residual (Vilaseca V, 2001).

Las bacterias nitrificantes están presentes en los procesos de purificación, este organismo es esencial en la formación del lodo activo por su velocidad para formar el floc biológico. Por otro lado las bacterias filamentosas se presencia de manera adversa a las características de sedimentabilidad del floc de lodos activados, el procesos biológicos aerobio de sedimentación es pobre, haciendo que el floc flote (Romero Rojas J, 1999).

**Protozoos:** Indican la edad, el estado del lodo y son organismos unicelulares que pueden metabolizar alimentos solubles e insolubles. Son organismos biológicos consumidores de bacterias y materia orgánica particulada, siendo los principales responsables de un efluente claro y de calidad. Actúan depurando el exceso bacteriano no floculado, es decir, bacterias libres o flóculos no formados. A su vez son indicadores de toxicidad debido a su sensibilidad, como también a los cambios de oxígeno en el reactor. (Vilaseca V. , 2001) Los protozoos más encontrados en un sistema de lodos activados son: Sarcodinas, Flagelados y Ciliados. (Vilaseca V. , 2001)

**Tabla 3.** Identificación de protozoos.

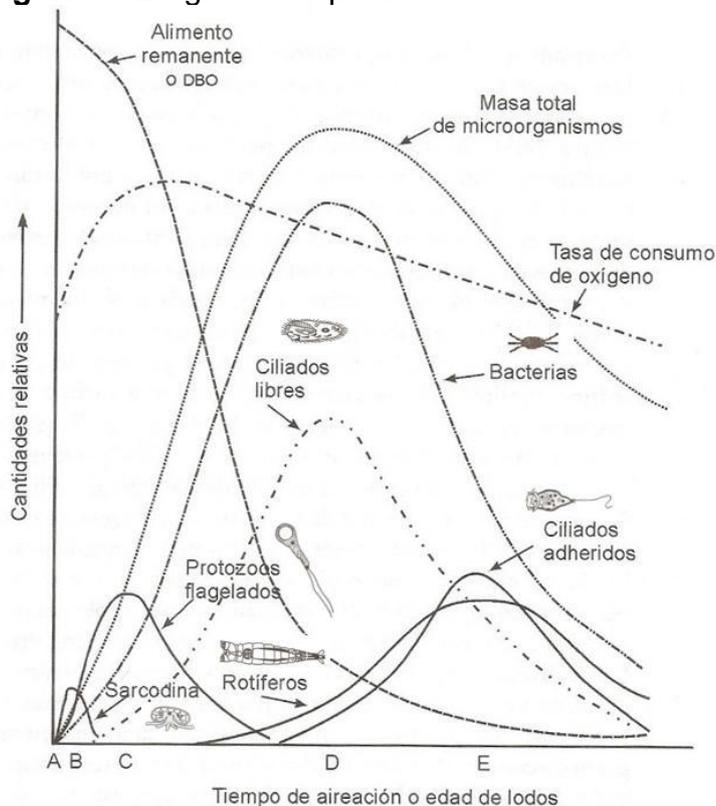
<p><b>Ciliados:</b> Organismos contribuyentes directamente en la clarificación del efluente por la floculación y la depredación. Las bacterias patógenas hacen parte de su alimento, proporcionando mejores calidades al agua. (Vilaseca V. , 2001). Los ciliados se pueden clasificar según su relación con el flóculo:</p> <p>Ciliados asociados al flóculo: Los pedunculados y los reptantes. Ciliados no asociados al flóculo: Los nadadores libres.</p>	
	<p><b>Ciliados nadadores libres</b> Tienen formas ovoides, redondeadas y alargadas. Miden entre 20 y 400 µm aproximadamente. Su mecanismo de locomoción son los cilios. Están presentes flóculos e indican un buen lodo activado.</p>
<p><b>Ciliados reptantes</b> Reptan sobre el lodo y su alimento son las bacterias, estructuras ciliares llamadas cirros, indicadores de buena calidad de lodo.</p>	
	<p><b>Ciliados Pedunculados</b> Ciliados asociados al flóculo. Tienen un pedúnculo, el cual puede ser fijo o contráctil. Se alimentan de bacterias libres. Son indicadores de un lodo estable.</p>

Fuente: Adaptado de Carpenter, 1979; Gómez Gómez, Lebrato Martinez, Bermúdez Sanchez , & Salguero Villadiego, 1999; Vilaseca V. , 2001; Rainforest, Perez Iizarazo, 2011.

La biología presente en los lodos activados es variable y dependen del suministro alimenticio, concentración del alimento, turbulencia, temperatura, tiempo de aireación y la concentración de lodos presentes en el sistema (Romero Rojas, 1999).

El diagrama de predominio relativo de los microorganismos (Figura 4), permite identificar el procesos por etapas del lodo activado, teniendo en cuenta algunas condiciones ideales del sistema como: temperatura (20°C), pH (6,5 a 8,5 unidades), oxígeno disuelto (mayor a 2 mg/L), nutrientes, ausencia de sustancias tóxicas. El diagrama esta representando en su eje horizontal el tiempo de aireación o la edad de lodos y en el eje vertical el número relativo de organismos (Romero Rojas J. , 2002).

**Figura 4.** Diagrama de predominio relativo.



Fuente: Orozco Jaramillo, 2005; Romero Rojas J. , 2002.

**A.** El proceso comienza introduciendo las aguas residuales frescas al tanque y se inicia la aireación. Los microorganismos existen pero ninguno predomina.

**B.** Los sarcodina son organismos primitivos. Estos microorganismos existen en grandes cantidades solo cuando el alimento es alto.

C. Los protozoos flagelados alcanzan su pico. Organismos más activos que los sarcodinas y consumen el alimento a una tasa alta.

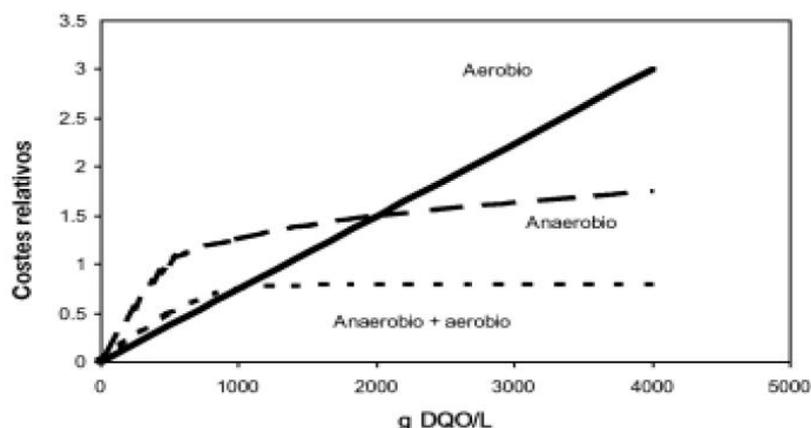
D. Los ciliados libres y las bacterias alcanzan su pico. Ambos subsisten con suministro alimenticio menor que el requerido por los protozoos flagelados. Esta es la zona de operación del proceso convencional de lodos activados.

E. Predominan los ciliados adheridos y los rotíferos. No existe suficiente alimento para sustentar la masa microbiol. Las celular mueren. Los rotíferos y los ciliados adheridos pueden consumir las bacterias.

### Sistema Combinado (UASB – Lodos Activados)

En la actualidad, los sistemas combinados son utilizados para aumentar la eficiencia en la remoción de aguas residuales industriales o domesticas, en algunos casos proporcionan depuraciones eficaces de compuestos orgánicos e inorgánicos (Guimarães, 2003). El sistema UASB - sistema lodos activados es un proceso el cual existe recuperación de energía mediante la reducción en la producción de lodos y metano en comparación a los sistemas convencionales (Figura 5). Al mismo tiempo, este par de tratamientos evita el incremento de costos de operación y energéticos, debido a las limitaciones de las grandes cantidades de deposición de materia orgánica extraída del reactor de lodos activados, incluyendo gastos de transporte y aplicación en el terreno, promoviendo un marco legal ideal para la disposición final de los residuos (B. Arrojo1, 2002). Estos procesos son utilizados en los países de America del Sur y Sur de Asia, donde el clima es calido y las condiciones ambientales no varían tan drásticamente (Ye Shi Cao, 2009).

Figura 5. Esquema de sistema anaerobio + aerobio.



Fuente: B. Arrojo1 et. al, 2002.

La depuración de algunos componentes como nitrógeno, fósforo, carbono y ácidos grasos volátiles (AGV) principalmente se lleva acabado en el reactor UASB, el cual estabiliza la carga orgánica y en secuencia con el reactor de

lodos activados (SLM) depuran componentes restantes estabilizando el agua residual. En su gran mayoría, el sistema de lodos activados es eficiente en la desnitrificación y nitrificación de alta tasa (Ye Shi Cao, 2009).

Ye Shi Cao y Chee Meng Ang (2009) demuestra que los tiempos de retención hidráulicos (TRH) mayores de 6 horas en el reactor UASB y 6,4 a 8 horas en el reactor de licor mixto incrementan la remoción de materia orgánica existente en aguas residuales tratadas, debido a la digestión adecuada de los microorganismos, extracción de residuos y gases que puedan alterar la microbiología de los reactores (von Sperling, 2001).

A nivel mundial los valores de remoción de materia orgánica se pueden representar en DQO, estos valores son indispensables para cuantificar la depuración efectuada por el tratamiento de aguas combinado. En el efluente del sistema anaerobio-aerobio se pueden presentar reducciones de materia orgánica en 78,8 a 86,4%, siendo el UASB el mayor depurador de MO en aguas residuales domésticas (Ye Shi Cao, 2009).

### **3.4 MARCO LEGAL**

Los tratamientos de agua residuales se han promovido a través del tiempo debido a los impactos ambientales que ha generado el hombre por medio de los vertimientos de aguas domésticas e industriales. El interés de estos procesos es reducir la contaminación presente en los vertimientos en diferentes cuerpos de agua, para ellos, es necesario establecer límites y condiciones sanitarias en las fuentes hídricas que puedan afectar a las comunidades. Por varios años, la legislación Colombiana ha desarrollado normas con el propósito de crear condiciones óptimas en los diferentes sistemas ambientales y dar continuidad al cumplimiento del artículo 79 de la Constitución Política de Colombia, de 1991.

El Decreto 1594 de 1984 el cual no está vigente en la actualidad, especifica los temas de vertimientos en cuanto a usos del agua y residuos sólidos. Debido a esto, Colombia desde octubre de 2010 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) mantiene la vigencia de un proyecto el cual valora límites máximos permisibles en los parámetros de vertimiento puntuales a cuerpos de agua continentales superficiales y sistemas de alcantarillado público. Sin embargo, este proyecto aún no cuenta con alguna resolución que obligue a su cumplimiento, dando precedencia en la actualidad al decreto 1594 de 1984.

La UPB seccional Bucaramanga es generadora de vertimientos líquidos a una fuente superficial de aguas, lo cual los parámetros exigidos según el capítulo VI del decreto 1594 de 1984 se encuentran en la tabla 4. Evaluar los parámetros exigidos periódicamente es primordial para el cumplimiento de la normatividad y el mejoramiento del sistema de tratamiento, evitando

sanciones y pagos de tasas retributivas contempladas en el Decreto 3100 de 2003.

**Tabla 4.** Parámetros exigidos según el Decreto 1594 de 1984

Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
pH	5 a 9 unidades	5 a 9 unidades
Sólidos suspendidos *	Rem > 50%	Rem > 80%

Fuente: Adaptado del artículo 72, del Decreto 1594 de 1984 “usa del agua y residuos sólidos”. \*Los porcentajes de remoción son respecto a la carga.

EL proyecto de vertimientos propuesto por el MAVDT se desarrollo con el fin de conocer el estado de los limites permisibles de las instituciones educativas he industrias, como también para la planificación al momento que se ratifique la resolución del proyecto debido a las exigencias en los parámetros de medición en comparación con el decreto 1594 de 1984. Sin embargo el proyecto también define los valores máximos permisibles en unidades de concentración y en el caso de instituciones educativas (UPB) se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5.** Parámetros exigidos en la Resolución de Octubre de 2010

Parámetro	Unidad	Instalación existente	Instalación nueva
pH	unidades	6,0 a 8,0	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	400,0	200,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	2,0	1,0
Nitrógeno Total (N)	mg/L	20,0	10,0

Fuente: Adaptación capítulo IV, Proyecto de resolución de MAVDT por la cual se establecen las normas y los valores limite máximos permisibles de parámetro en vertimientos puntuales a sistemas de alcantarillado publico y a cuerpos de agua continentales superficiales, MAVDT, 2010.

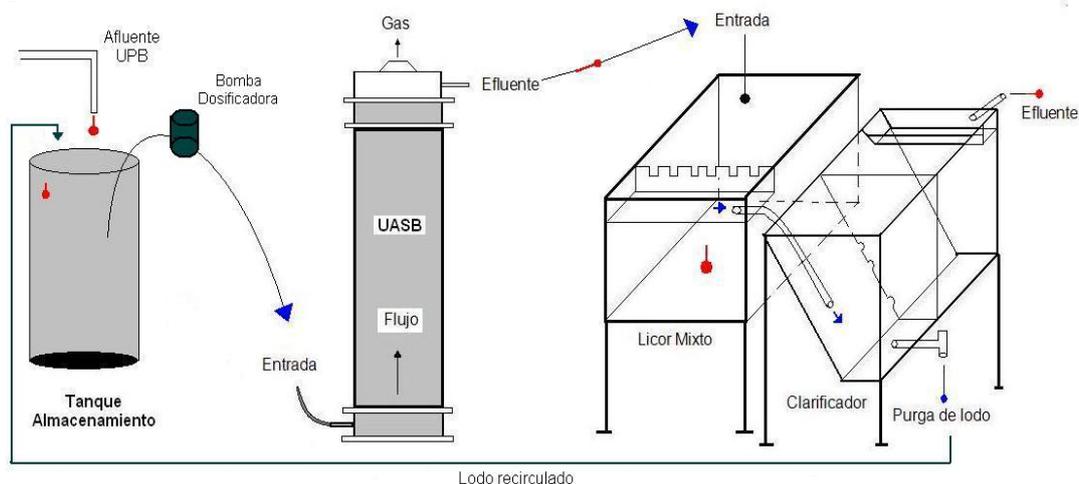
## 4. METODOLOGIA

Para evaluar las condiciones del agua residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga en cada etapa del proceso de recirculación anaerobio-aerobio a escala de laboratorio, fue necesario implementar 3 fases para delimitar el seguimiento del sistema. En las 3 fases el autor realizó todas las mediciones físico-químicas del laboratorio, excepto las pruebas de nitrógeno amoniacal, las cuales fueron realizadas por la auditoria del Laboratorio de Análisis Químico de Aguas del ICP en Bucaramanga, de igual manera las pruebas fueron realizadas siguiendo el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition.

**FASE 1:** Condiciones iniciales de montaje y operación en los reactores anaerobio-aerobio.

El sistema combinado anaerobio-aerobio a escala de laboratorio fue diseñado con el propósito de reducir las concentraciones de materia orgánica y nitrógeno amoniacal en una porción determinada de agua residual proveniente de la institución educativa UPB seccional Bucaramanga. A su vez, la capacidad de flujo fue determinada por medio de las bombas dosificadoras, las cuales fueron utilizadas en prototipos anteriores en tratamientos a escala de lodos activados (Pérez Lizarazo, 2011). En la figura 6 muestra el esquema empleado en el montaje del estudio.

**Figura 6.** Sistema combinado anaerobio-aerobio.



Fuente: Autor

Las principales características en volumen del sistema a escala de laboratorio se encuentran en la tabla 6, donde permitió establecer el tamaño ideal. Algunos de ellos como el tanque de almacenamiento permitieron

homogenizar la concentración en la entrada al reactor UASB. El reactor UASB es alimentado con el afluente UPB, mediante una bomba dosificadora mostrada en la figura 7 de marca HANNA INSTRUMENTS, referencia BL20, con capacidad de 18.3 litros por hora. En el caso del reactor de lodos activados fue utilizado un motor de 1 caballo de fuerza para generar aireación de mezcla completa en el licor mixto (anexo 1).

**Tabla 6.** Volumen de tanque de almacenamiento y reactores.

Reactores y tanque de almacenamiento a emplear	Volumen Útil
Tanque de almacenamiento de afluente UPB.	200 litros por unidad
UASB	120 Litros
Lodos Activados	130,35 Litros
Tanque de sedimentación	99,856 Litros

Fuente: Autor

En el arranque del sistema combinado fueron establecidas características del lodo anaerobio y aerobio. El UASB se inoculó con lodo procedente del reactor RAP de la UPB seccional Bucaramanga y el volumen ideal para adicionar en el UASB es 50% al volumen total del reactor, donde el 50% restante es agua residual del afluente seleccionado. De igual manera el reactor aerobio de licor mixto fue inoculado 55% de lodo anaerobio del reactor RAP y llenado con el efluente UASB por flujo libre. Se espero la maduración del licor mixto para realizar el arranque del sistema combinado (Shi Cao, 2009).

**Figura 7.** Bomba dosificadora.



Fuente: Autor.

Para tener datos representativos y confiables, fue ideal realizar mediciones de los parámetros expuestos en la tabla 7, donde muestra la frecuencia adecuada para la toma de datos según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition.

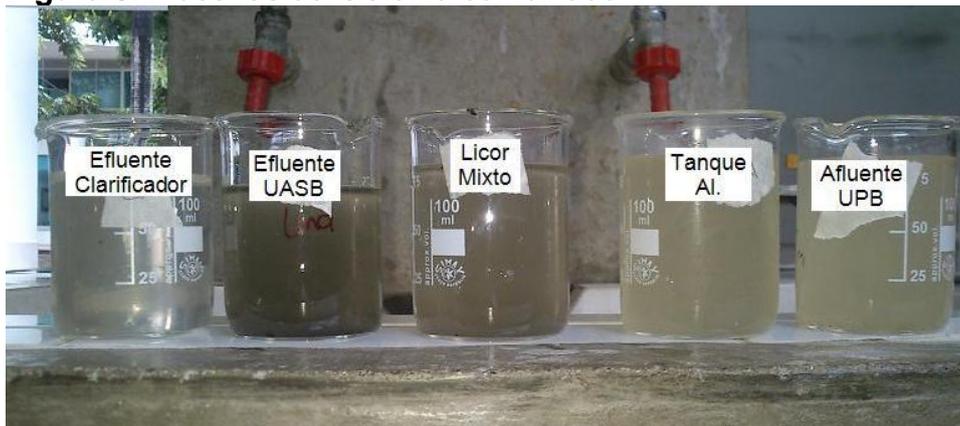
**Tabla 7.** Parámetros de medición.

Parámetro	Método	Código*	Frecuencia
DQO	Flujo Cerrado con espectrofotómetro	5220	Diaria
pH	pH metro		Diaria
Sólidos	Sólidos totales	2540 B	Tres veces por semana
	Sólidos totales volátiles	2540 E	
	Sólidos sedimentables	2540 F	
Temperatura	Multiparametro		Diaria
Oxígeno Disuelto	Multiparametro		Diaria
Alcalinidad	Método titulométrico	2320B	3 veces por semana
Nitrógeno (NTK)	Método Kjeldahl	4500-N	Una vez por semana
Conductividad	Conductímetro	2510-C	Diaria

Fuente: (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition).

**Toma de muestras en el sistema:** Las muestras fueron tomadas en los puntos más importantes del sistema combinado, con el fin de identificar los cambios efectuados a través del tiempo y la depuración de agua residual que se genera al pasar por los reactores. Se caracterizaron 5 muestras en cada medición (figura 8), las cuales son: 1) Muestra en afluente UPB, 2) Muestra en tanque de almacenamiento, 3) Muestra en efluente UASB, 4) Muestra licor mixto (prueba de sólidos, microbiológica), 5) Muestra de efluente del clarificador.

**Figura 8.** Muestras del sistema combinado



Fuente: Autor

**Operación de los reactores:** El marco experimental se realizó en dos etapas donde el caudal y lodo recirculado cambió con el fin de obtener diferencias significativas en el proceso de remoción de aguas residuales

(Tabla 8). Sin embargo el sistema combinado fue puesto en marcha durante 5 días sin recirculación y con un caudal de 0,0071 L/seg a la entrada del reactor UASB. Durante los 5 días se tomó muestras físico-químicas con el fin de caracterizar las remociones de materia orgánica y obtener las condiciones iniciales del sistema combinado. La estabilización de lodo anaerobio repercute en el tratamiento, por lo cual también se esperó a la maduración del lodo aerobio ya que tuvo un arranque con lodo anaerobio, para ello, se retiró diariamente el lodo sedimentado en el clarificador y recirculado al tanque de licor mixto, con el fin de mejorar las condiciones del sistema aerobio, como también evitar el colapso de lodos en el sedimentador.

**Tabla 8.** Cambios en la operación del sistema combinado

Muestra	Etapa No 1	Etapa No2
Caudal	0,0071 L/seg	0,01 L/seg
Lodo recirculado del clarificador	70%	100%

Fuente: Autor

El tiempo de retención hidráulico en el reactor UASB en la primera etapa fue 282 minutos y en la segunda etapa 200 minutos. Se aplicó por medio de los estudios realizados por G. Guerra 2000, dando como principio mejor calidad de lodo para el funcionamiento del reactor. Por otra parte el reactor de licor mixto tuvo mayor tiempo de retención hidráulico debido a su volumen y un menor (TRH) en el sedimentador.

Durante las dos etapas hubo toma de muestras puntuales desde el inicio de semana (lunes) hasta el final de semana laboral (sábado), excepto las muestras de nitrógeno, las cuales se tomaron una vez cada semana (jueves) y las muestras microbiológicas cada 14 días, se realizó empleando el microscopio compuesto binocular Olympus CH6 1000X.

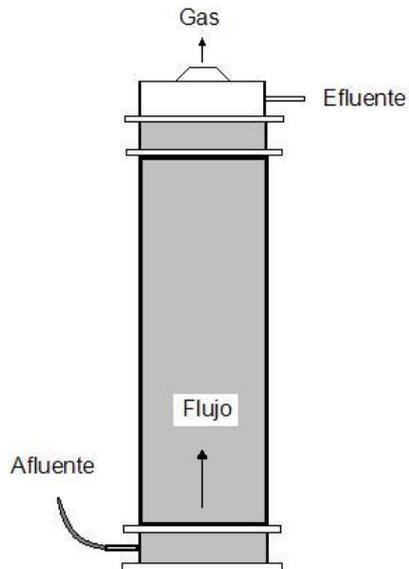
**Análisis de resultados:** El ajuste de las condiciones iniciales se llevó a cabo mediante archivos referentes al sistema combinado, operaciones in-situ y la ecuación para identificar tiempo de retención hidráulico (Anexo 2).

**FASE 2:** Proceso de depuración de la materia orgánica al recircular una fracción de lodo, mediante el sistema aerobio-anaerobio.

El tratamiento anaerobio-aerobio fue alimentado constantemente por el afluente UPB y depositado en los tanques de almacenamiento mediante una bomba de succión, de esta manera el agua residual del tanque estuvo constantemente agitada evitando la sedimentación del afluente UPB y del lodo recirculado, de modo que el agua residual acumulada fue dosificada y enviada al reactor UASB (figura 9) por medio de una bomba de tal manera que el manto de lodo del reactor anaerobio pueda depurar gran cantidad de materia orgánica e inorgánica. Sin embargo los gases producidos por la

descomposición de la materia no fueron tratados ni quemados, ocasionando mal olor in situ. El agua sobrenadante en la parte superior del reactor anaerobio fue enviada directamente al sistema aerobio en condiciones de flujo libre por medio de una canal circular.

**Figura 9.** Reactor UASB



Fuente: Autor

El sistema de lodos activados fue aireado mediante un motor el cual realizó mezcla completa del licor mixto, a fin de generar condiciones biológicas adecuadas. El efluente generado por este proceso fue tomado y enviado en flujo libre al clarificado, con el fin de retener los sólidos sedimentables en la tolva1 como muestra la figura 10.

**Figura 10.** Sólidos sedimentables en la tolva1.



Fuente: Autor

Durante cada etapa el lodo sedimentado fue retirado diariamente del clarificador y enviado al tanque de almacenamiento según el contenido porcentual de lodo a adicionar. En la primera etapa se adicionó un 70% y el 30% restante fue desechado del sistema, a diferencia de la segunda etapa en la cual la totalidad del lodo acumulado de cada día (100%) fue enviado al tanque de almacenamiento.

**FASE 3.** Evaluación del acoplo a escala de laboratorio según el proceso anaerobio-aerobio y fracción porcentual óptima de lodos en un sistema de recirculación.

Mediante los procesos utilizados en el acoplo del sistema a escala de laboratorio y los análisis obtenidos. Se permite identificar las ventajas en la reducción de materia orgánica, donde se comprara la diferencia porcentual entre el arranque durante 5 días, la etapa 1 y la etapa 2, así mismo la concentración de carga orgánica que se obtuvo en el tanque de almacenamiento y en cada reactor. No obstante los muestreos físico-químicas y los análisis microbiológicos promueven un seguimiento adecuado para demostrar la factibilidad del sistema.

Las características propuestas fueron aplicadas para demostrar la eficiencia del sistema en condiciones extremas, debido al alto volumen de lodo recirculado (70% y 100%) y un tiempo de retención hidráulico más corto a comparación de los análisis realizados por A. C. van Haandel et. al, 2011, los cuales constan de un TRH mayor.

## 5. ANALISIS Y RESULTADOS

El estudio estuvo centrado en las remociones de materia orgánica mediante un tratamiento combinado, el cual según la literatura presenta mejores condiciones de depuración de materia orgánica en comparación con los sistemas convencionales. No obstante las condiciones iniciales del sistema combinado se realizaron sin recirculación de lodo aerobio, con el fin de determinar el rendimiento en la depuración de materia orgánica en los reactores anaerobio-aerobio y así estimar la diferencia del tratamiento acoplado con recirculación. La tabla 9, referencia los porcentajes removidos de materia orgánica teniendo en cuenta las concentraciones iniciales de materia orgánica están sujetas al contenido del tanque de almacenamiento que se presentaron en el sistema (Figura 11). Donde los valores del tanque de almacenamiento de agua residual no sobrepasan 556,01mg/L de DQO (anexo 3), lo cual indica que es necesaria un mayor TRH y/o concentración de sustrato para aumentar la eficiencia del reactor UASB y del licor mixto (Lettinga et al, 1980).

**Tabla 9.** Porcentaje de remoción en condiciones sin recirculación.

Porcentaje de Remoción %						
<b>Remoción Sistema Anaerobio</b>	45,1	43,6	29,7	37,1	42,4	53,6
<b>Remoción Sistema Aerobio</b>	37,2	35,2	50,9	45,3	29,4	23,1
<b>Remoción Total</b>	82,3	78,8	80,7	82,4	71,7	76,7

Fuente: Autor.

**Figura 11.** Tanques de almacenamiento.



Fuente: Autor.

En el sistema anaerobio-aerobio con recirculación de lodo aerobio fue puesto en marcha después del arranque sin recirculación. Durante las dos etapas se tomaron muestras físico-químicas y biológicas, a fin de identificar el rendimiento de tratamiento acoplado.

Los valores consignados de pH, temperatura y conductividad, no fueron graficados ni relacionados debido a los resultados uniformes de estos parámetros físico-químicos. La tabla 10 referencia el promedio y desviación estándar de la temperatura y la conductividad, a diferencia del pH (Tabla 11) que se consigna en mediana y desviación estándar (anexo 4).

**Tabla 10.** Registro de Temperatura y conductividad.

E1 y E2	Etapa1		Etapa2	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
<b>°C</b>	<b>Temperatura</b>		<b>Temperatura</b>	
Tanque de almacenamiento	24,28	0,67	23,92	1,45
Salida UASB	24,18	0,40	23,88	1,64
Efluente	23,68	0,68	23,57	1,23
<b>µS</b>	<b>Conductividad</b>		<b>Conductividad</b>	
Tanque de almacenamiento	1334,08	122,99	1314,86	174,91
Salida UASB	1455,27	163,59	1520,64	111,22
Efluente	1321,50	135,54	1416,57	79,41

Fuente: Autor

**Tabla 11.** Registro pH

E1 y E2	Etapa1		Etapa2	
	Mediana	Desviación estándar	Mediana	Desviación estándar
<b>unidades</b>	<b>pH</b>			
Tanque de almacenamiento	7,68	0,39	7,98	0,30
Salida UASB	7,49	0,30	7,52	0,15
Efluente	8,10	0,12	8,165	0,10

Fuente: Autor

Las condiciones de temperatura muestran cambios no significativos, debido a las circunstancias medio ambientales en las que se encontró el sistema combinado para un proceso eficiente, lo cual permite despreciar la temperatura como factor potencia en la variación del oxígeno disuelto y de los procesos microbiológicos. De igual manera, los datos de conductividad obtenidos en los muestreos indican la existencia de gran cantidad de iones libres, lo que permite identificar una calidad de agua no apta para el consumo

humano, no obstante la variabilidad que se presenta en todo el sistema, es dado por el aumento en la descomposición de materia orgánica y por la variación del caudal (Chalarca Rodríguez et. al, 2007).

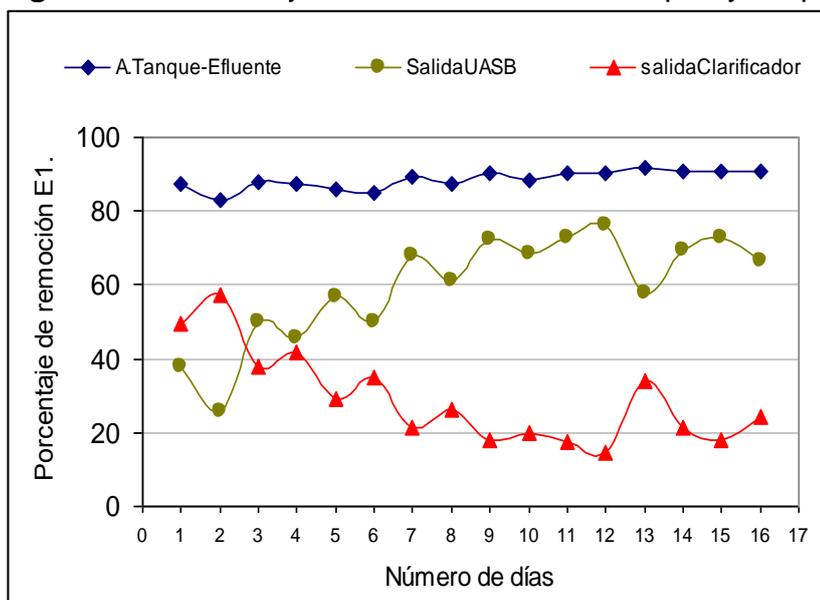
La estabilización del pH mostrada en la salida del reactor UASB, garantiza condiciones adecuadas en los procesos bacterianos generados en el sistema anaerobio, y por consiguiente el aumento significativo del pH en la salida del sistema, el cual genera límites permisibles aceptados según la resolución expuesta en el MAVDT, 2010 para fuentes receptoras.

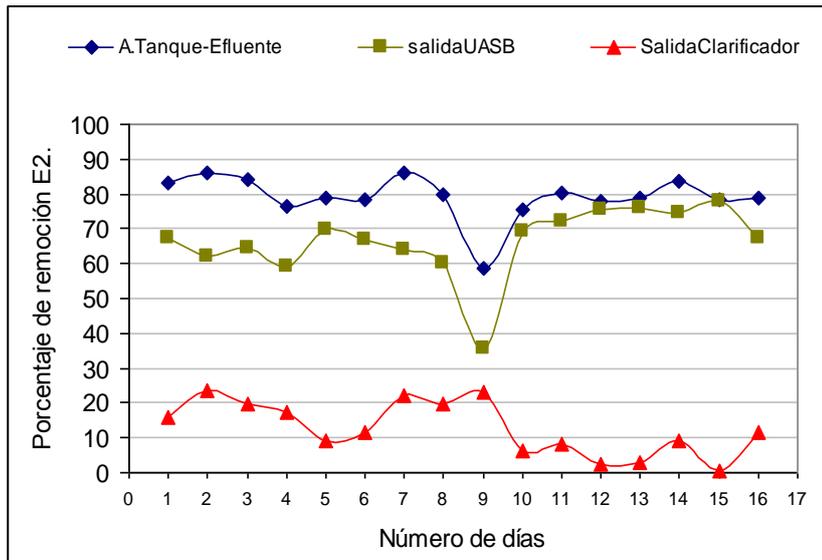
## 5.1 FRACCIÓN DEPURADA EN EL AGUA RESIDUAL

Para determinar la remoción porcentual de materia orgánica es aconsejable realizar análisis de DQO de tal manera que sea caracterizado el inicio (tanque de almacenamiento) y efluentes del sistemas (UASB y clarificador) con el objetivo de definir los cambios ocasionados en las dos etapas propuestas en el estudio (anexo 5).

La Figura 12 muestra los resultados porcentuales en la remoción de la MO, donde el caudal define cada etapa (E1-0,0071L/seg y E2-0,01L/seg). La respuesta hacia la degradación de materia orgánica al pasar por la totalidad del sistema (A.Tanque-Efluente) con recirculación es más eficiente E1 que E2, donde E1 remueve más cantidad de MO (82,97% a 91,58%) en comparación a E2 (58,43% a 86,23%). Sin embargo en los dos sistemas el UASB responde al incremento en la carga orgánica en el lodo recirculado (100%), lo cual indica la eficiencia del reactor anaerobio para soportar TRH bajos (G. Lettinga, 2011).

**Figura 12.** Porcentajes de Remoción en la Etapa1 y Etapa2.





Fuente: Autor.

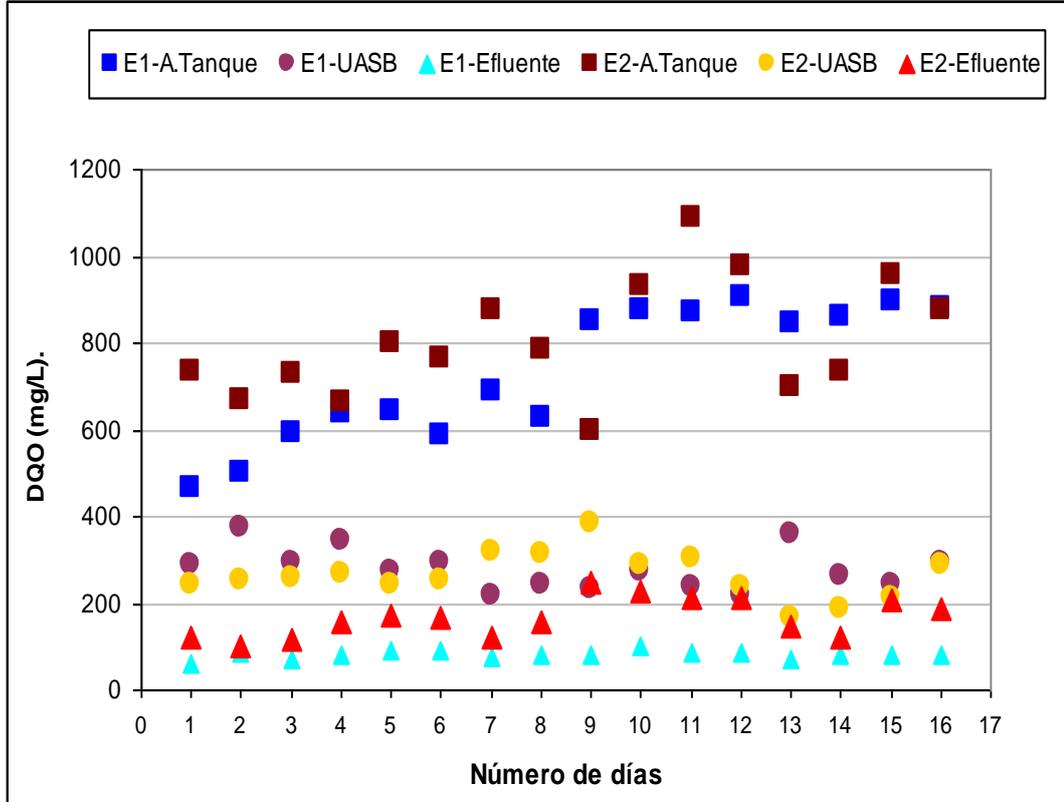
Al analizar los resultados en los efluentes UASB y clarificador, se observa una secuencia de muestras inversamente proporcionales en las dos etapas, debido a las condiciones físico-químicas y biológicas que ofrece el sistema anaerobio al aerobio. El tratamiento aerobio presenta deficiencias al requerir más oxígeno disuelto para amortiguar el efluente anaerobio y mejorar las condiciones microbiológicas, a fin de obtener un sistema estable con mayor rendimiento en el sistema acoplado (Ye Shi Cao, 2009).

La causa del decaimiento en el sistema E2 es el incremento de TRH, el cual dispone un menor tiempo de aireación en el licor mixto para amortiguar las condiciones del agua residual anoxigénica que provienen del efluente UASB, además de un aumento en la carga por la recirculación.

**Remoción de DQO:** Los compuestos orgánicos como inorgánicos de una muestra están sujetos a la oxidación (Romero Rojas, 1999). Sin embargo los resultados obtenidos son publicados con respecto a la concentración de materia orgánica (mg/L) depurada en las muestras adquiridas de E1 y E2.

Los efectos caracterizados en la depuración del agua residual por medio del DQO son evidenciados en la figura 13, la cual expresa el monitoreo puntual de cada proceso (Tanque de almacenamiento, salida UASB y Efluente), a fin de identificar la variabilidad al recircular 70% (E1) o 100% (E2) del lodo extraído del sedimentador, como también los cambios en el TRH.

**Figura 13.** Remoción por DQO en la Etapa1 y Etapa2.



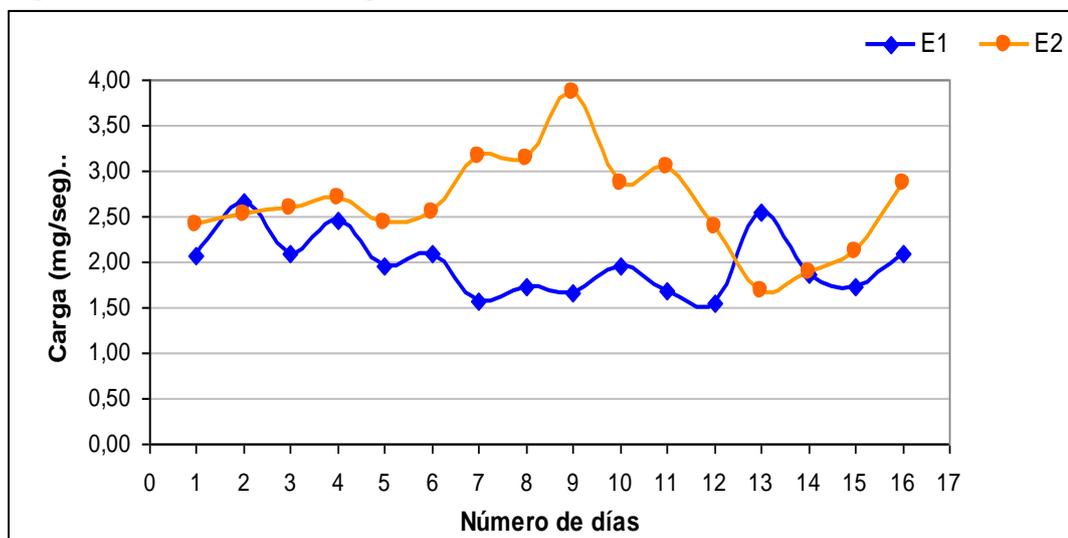
Fuente: Autor.

Al incrementar el caudal y el lodo recirculado al 100% en la Etapa2, se puede evidenciar un aumento de materia orgánica en el tanque de almacenamiento (A.Tanque), ocasionando cambios representativos en el sistema aerobio debido a la reducción del TRH, la cual produjo una inhibición en la alimentación y en el crecimiento de los microorganismos. Sin embargo el rendimiento de E2 en comparación a E1 es mejor, debido al aumento en el TRH y al lodo recirculado. No obstante el reactor anaerobio mantuvo semejantes las remociones de sustrato en las dos etapas, puesto que el sistema UASB es capaz de retener una alta cantidad de biomasa y su resultado es una edad de lodo mucho mayor que el TRH (G. Lettinga, et al. 2011).

A pesar de los antecedentes en la remoción de sustrato en E2, E1 expone la eficiencia por medio de la materia orgánica depurada (59,44 mg/L a 100,33 mg/L) alcanzado por el efluente, con un caudal de 0,0071L/seg y un porcentaje de recirculación de 70%, donde los datos puntuales son menos dispersos al trascuir el número de días debido a las mejores condiciones del sistema combinado con recirculación (anexo 6).

Para definir la cantidad de sustrato existente en un segundo del flujo, es necesario establecer el índice de carga (Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante, 1998). Las condiciones representadas del reactor UASB, afirman la capacidad para depurar y retener gran cantidad de materia orgánica en el sistema, por lo cual es de gran interés cuantificar las cargas del sustrato que salen del sistema UASB. La Figura 14, muestra la porción de materia orgánica que se expulsa en la salida del reactor anaerobio, donde E2 presentó más sustrato expulsado, lo que afirmó el descenso en la remoción de MO en el licor mixto al obtener menos tiempos para oxidar más materia con menos oxígeno libre.

**Figura 14.** Índice de Carga en el reactor UASB.



Fuente: Autor.

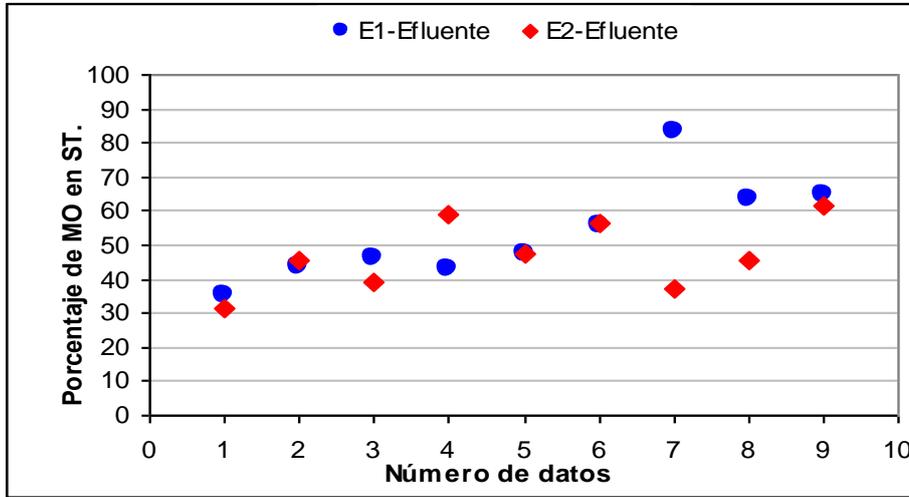
**Materia orgánica en ST:** Las pruebas de sólidos totales y sólidos volátiles totales se realizaron con el fin de determinar la cantidad de materia orgánica (gramos) en una muestra de 50 ml obtenida en el efluente. A fin de registrar el nivel porcentual de materia orgánica que puede ser expuesta a un sistema terciario de tratamiento de agua residual y/o fuente hídrica.

Los resultados consignados en la figura 15, muestran la fracción porcentual de MO en cada día, donde E1 y E2 presentan datos variables debido a la inestabilidad metabólica que se presentó en las remociones de DQO por parte de los reactores y del afluente UPB. Sin embargo, en E2 los sólidos orgánicos (mg/L) están presentes en menor cantidad que E1, dado que las muestras de E1 contienen una mayor fracción de muestras puntuales por encima de E2 en los ST (anexo 7).

Se observó que los porcentajes de sustrato no superaron el 83,04% (0,0166 mg/L) en ninguna de las dos etapas, esta fracción de materia orgánica

permite identificar las condiciones extremas del efluente, dadas por el tratamiento anaerobio-aerobio con recirculación de lodos.

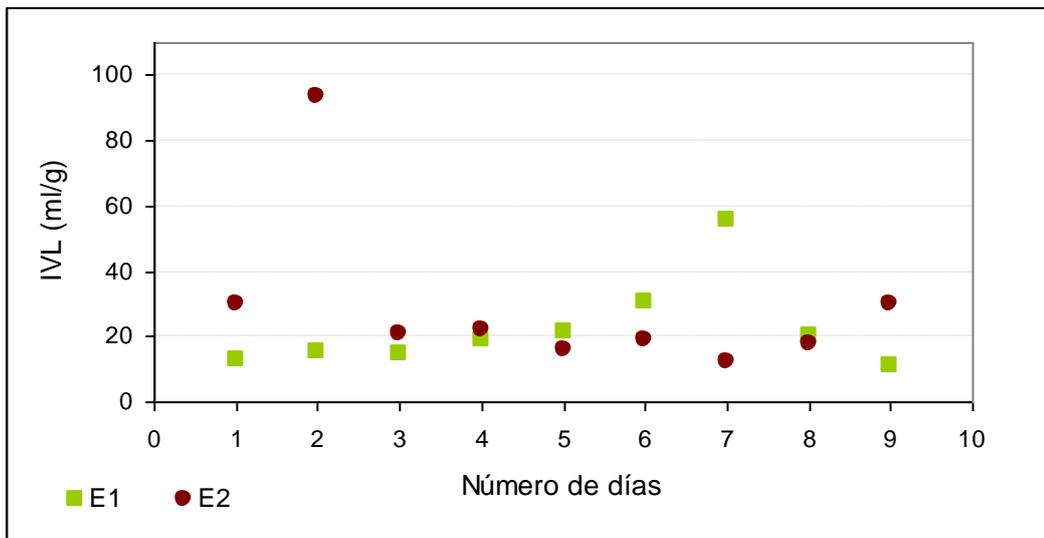
**Figura 15.** Porcentaje de materia orgánica en los ST.



Fuente: Autor.

Los sólidos volátiles junto a los sedimentables también son requeridos a la hora de establecer el índice volumétrico de lodo, el cual aporta la información necesaria para identificar el volumen específico del lodo en el clarificador. La Figura 16, consigna los valores puntuales de IVL en relación al número de días, no obstante, cuando los datos sobrepasan 100ml/g de IVL, se puede afirmar la existencia de un lodo altamente no sedimentable (Orozco Jaramillo. A, 2005). Las condiciones referidas en las dos etapas, demostró que la totalidad de los datos son inferiores a 100 ml/g, lo cual expresa un IVL adecuado para la asentabilidad (anexo 8).

**Figura 16.** Índice volumétrico de lodo (IVL)



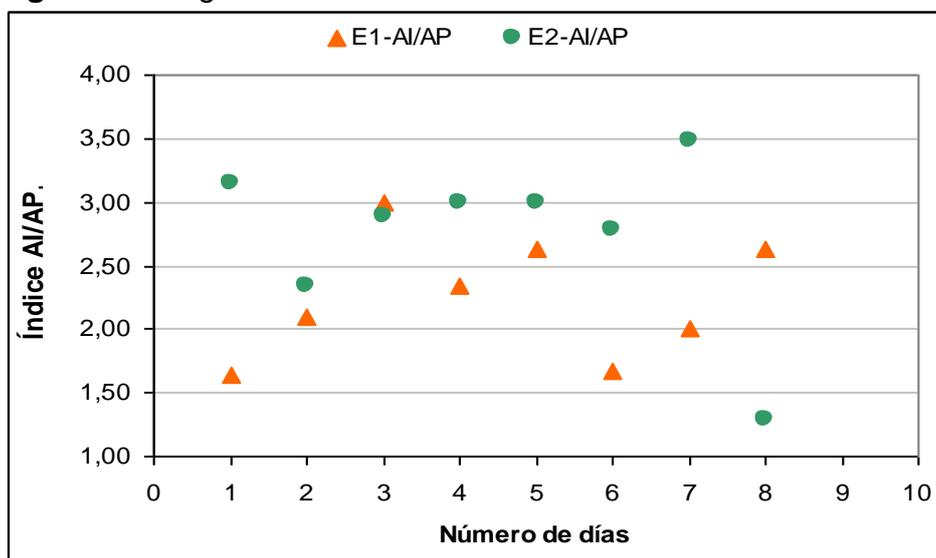
Fuente: Autor.

## 5.2 ANÁLISIS DE AI/AP Y OXÍGENO DISUELTO

**Índice buffer (AI/AP):** Debido a las condiciones del reactor UASB, es necesario tener presente el estado físico-químicas del sistema para poder evaluar los cambios bruscos generados por las actividades metabólicas. La alcalinidad es un factor que proporciona estabilidad y amortiguamiento a los ácidos grasos volátiles (AGV), sin embargo, cuando el bicarbonato no es suficiente para neutralizar los ácidos volátiles, ocurre una caída de pH, provocando que el reactor UASB sea inestable (anexo 9)

La figura 17, presenta el estado de AI/AP en el tratamiento UASB. Las condiciones observadas se muestran sensibles dado que el contenido AGV es mayor al contenido de bicarbonato. Este fenómeno ocurre cuando las bacterias metanogénicas no degradan en su totalidad los ácidos grasos presentes en el sistema, ocasionando inestabilidad (Tabla 12). No obstante, es eventual que la estabilidad ocurra para valores de AI/AP de 0,3 a 8, siendo 8 el valor máximo de inestabilidad, ya que al superar este valor el reactor UASB tiende a acidificarse y por consiguiente inhibe cualquier tipo de procesos metabólico en el reactor (A.C van Haandel, et al. 1998) citado por (Cajigas Ceron, et al. 2005).

**Figura 17.** Seguimiento de AI/AP en el sistema UASB.



Fuente: Autor.

Los puntos expuestos por E2 especifica el incremento de inestabilidad en comparación a E1, el cual mantiene la diferencia AGV/Bicarbonato en menor proporción durante todo el proceso de experimentación. Sin embargo a

causa del índice buffer se garantizó en las dos etapas la neutralización de los AGV al no acidificar el reactor, donde el pH no fue inferior a 7,2 unidades. De esta manera es indispensable determinar Al/AP, puesto que es excelente indicador para el control del proceso anaerobio (Cajigas Ceron, et al. 2005).

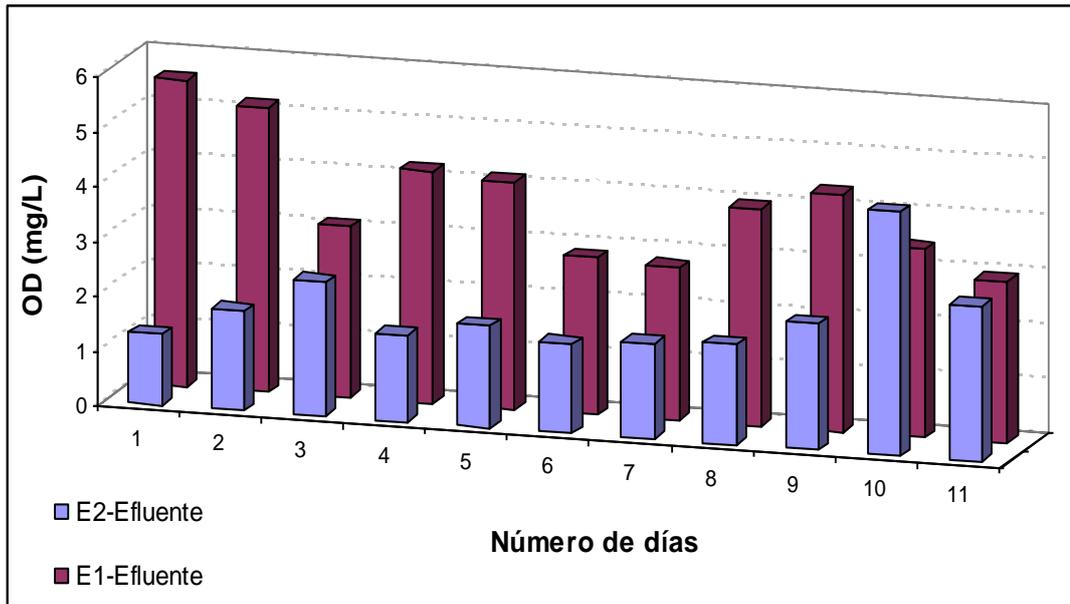
**Tabla 12.** Contenido de Bicarbonato y AGV en 50 ml de muestra.

<b>E1 (ml)</b>								
Bicarbonato	0,55	0,55	0,35	0,45	0,4	0,6	0,3	0,4
AGV	0,9	1,15	1,05	1,05	1,05	1	0,6	1,05
<b>E2 (ml)</b>								
Bicarbonato	0,35	0,6	0,45	0,45	0,45	0,45	0,33	0,85
AGV	1,1	1,4	1,3	1,35	1,35	1,25	1,15	1,1

Fuente: Autor

**Oxígeno disuelto (OD):** En la figura 18 se observa las cantidades de oxígeno disuelto en el efluente E1 y E2, a fin de analizar el comportamiento del sistema durante los periodos de muestreo (anexo 10). La variación en el caudal (0,0071L/seg a 0,01L/seg), genera diversos cambios en la porción de OD en el agua, donde E2 manifiesta los índices más bajos en el efluente por la insuficiencia de oxígeno libre después de realizar los procesos de oxidación necesaria en la materia orgánica. La falta de OD en el tratamiento aerobio repercute en el aumento del índice de carga, como se expresa en la figura 14. Sin embargo durante la etapa 1, con caudal de 0,0071L/seg, mantiene índices de OD más elevados, esto mejora las condiciones en el proceso de recirculación de lodo aerobio a un 70%, como también buena concentración de OD en el efluente.

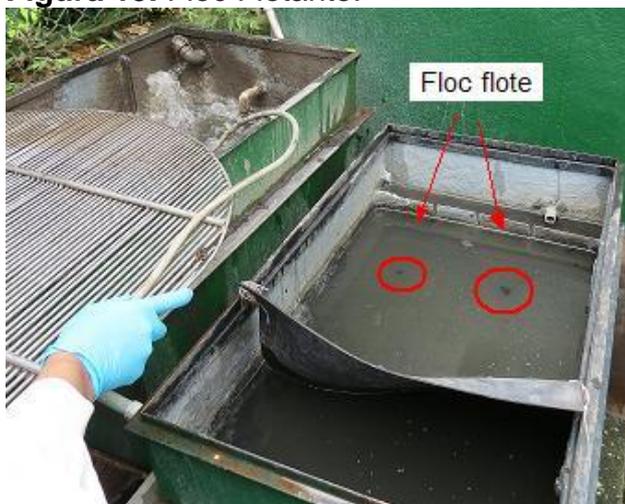
**Figura 18.** Oxígeno disuelto adquirido en el sistema aerobio.



Fuente: Autor.

A causa de la aireación en el sistema y el aumento en el TRH, los microorganismos tienden a inhibir algunos procesos metabólicos, entre ellos, la formación de lodo no maduro, lo cual ocasiona floc flotante en el clarificador (Figura 19). Este floc flotante es también conocido como lodo sobrenadante y hace presencia en el sedimentador cuando existe alta turbidez, baja decantación de lodo y desenso del TRH (Enrique J. La Motta1 et. al, 2007).

**Figura 19.** Floc Flotante.



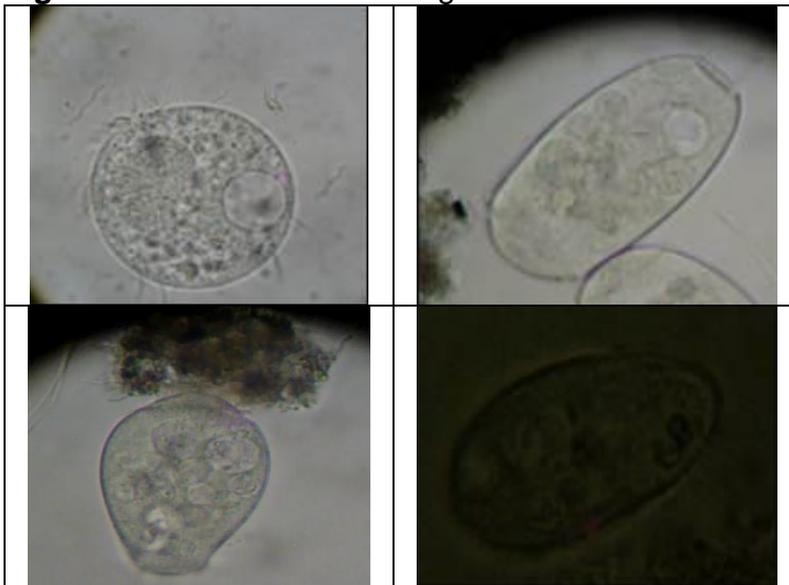
Fuente: Autor.

### 5.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

La comunidad microbiológica evoluciona a medida que el lodo se desarrolla, se estabiliza, madura y envejece. En el sistema combinado se presentan dos reactores, cada uno de ellos contiene tipos de vida microbiana. El sistema anaerobio cultiva bacterias en un lecho filtrante anoxigénico, lo que reduce la presencia de biodiversidad. A diferencia, el sistema aerobio contiene mayor biodiversidad en cuanto a organismos autotrofo y heterótrofos debido a las condiciones oxigénicas (anexo 11).

**Etapa 1:** Los resultados adquiridos en el monitoreo de los reactores UASB y licor mixto, definen las características del lodo mediante los microorganismos heterótrofos encontrados en las muestras. En el sistema de licor mixto se encontraron protozoos ciliado nadador, ciliados sésil, ciliados reptantes y ciliados de colonia (Figura 20). Estos microorganismos hacen referencia a una microbiota con lodo en etapa madura, haciendo que el sistema aerobio radique en un estado convencional y estable (Orozco Jaramillo, 2005). No obstante el sistema anaerobio al tener condiciones anoxigénico, no se evidenció organismos heterótrofos (protozoos) en la muestra puntual analizada.

**Figura 20.** Muestra microbiológica de licor mixto en etapa 1-(40x).



Fuente: Autor.

**Etapa 2:** El grupo de protozoos presentes en la muestra de licor mixto están constituidos por ciliados nadadores, ciliados reptantes y ciliados sésil (Figura 21). La presencia de estos organismos infiere la existencia de un lodo con características de sedimentación baja, debido al predominio de cilios nadadores en la muestra, los cuales no se asocian directamente a los flóculos por la reducción en el TRH (Vilaseca V, 2001). Al igual que en la etapa 1, las condiciones anoxigénico inhiben el crecimiento de los organismos heterótrofos.

**Figura 21.** Muestra microbiológica del licor mixto en etapa 2-(40x).



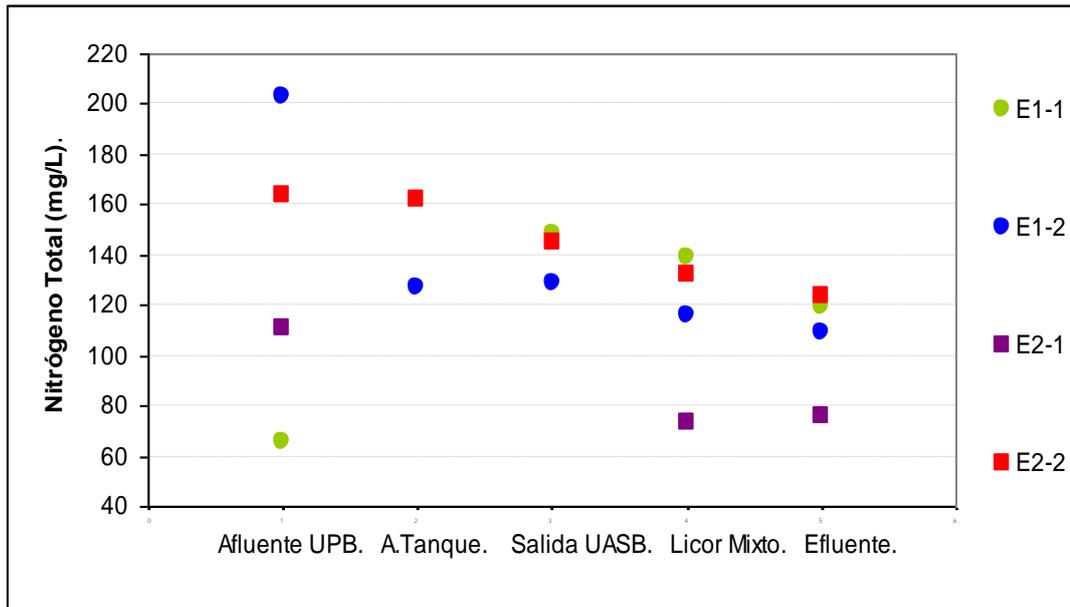
Fuente: Autor.

Según la caracterización de microorganismos heterótrofos expresados en cada etapa del licor mixto, se puede identificar una microbiota de lodo joven en proceso de maduración debido al predominio de ciliados nadadores libres, donde la existencia de estos organismos manifiesta bajas condiciones del metabolismo microbiológico para formar flóculos. Sin embargo, los cilios pedunculares y reptantes son asociados a los flóculos dándole calidad en cuanto a peso y composición. La riqueza microbiológica de protozoos es directamente responsable de la claridad y calidad en el efluente, como también en la eliminación de bacterias patógenas. No obstante es evidente la repercusión del descenso en el tiempo de aireación y TRH, dado que el aumento del flujo inhibe las condiciones ideales para la formación del flóculo (Vilaseca V, 2001).

#### **5.4 NITRÓGENO TOTAL (NT)**

En la tabla 22, se evidencian los resultados adquiridos de nitrógeno total en cada sección del tratamiento combinado. Donde se demostró el alto contenido de NT con excepción de la muestra E1-1 en la sección Afluente UPB, puesto que la muestra fue tomada el día sábado, donde la cantidad de estudiantes disminuye drásticamente, provocando un descenso en la concentración de nitrógeno total. Sin embargo el sistema combinado con recirculación causa remociones significativas en cada sección del sistema, dando valores porcentuales en la remoción de 24,39% a 46,63%, en el cual obtuvo mayor remoción la etapa 1 (E1) (anexo 12).

**Figura 22.** Cantidad de nitrógeno Kjeldhal en E1 y E2.



Fuente: Autor.

Al transcurrir el nitrógeno kjeldahl por el flujo del sistema combinado, el NT no se degrada en altos porcentajes de remoción. Esto se debe a bajas concentraciones de materia orgánica y bajo tiempo de retención hidráulico en el licor mixto, lo cual es evidente en los análisis ya descritos. Las bajas concentraciones de materia orgánica impiden la remoción del nitrógeno total debido a la deficiencia de carbono libre en la muestra, dado que el carbono está incluido en la MO y es consumido por las bacterias y protozoos para realizar los procesos de degradación, de manera que es necesario ingresar mayor carga orgánica al sistema combinado con el fin de mantener cantidades suficiente de carbono en el sistema anaerobio y aerobio para la remoción de NT. No obstante, el bajo TRH evita una prolongada oxigenación en el reactor de licor mixto, lo que perturba la oxidación química y metabólica por los microorganismos del nitrógeno total. Por lo tanto, puede ser necesario retener la materia orgánica en periodos de tiempo superiores a 6,3 horas (Ye Shi Cao, 2009).

## 6. CONCLUSIONES

- Los porcentajes en la remoción de materia orgánica en la etapa 1 están delimitados de 82,97 a 91,58%, donde las condiciones en el TRH permiten que el sistema anaerobio-aerobio depure con satisfacción la carga empleada. Sin embargo, la etapa 2 decae en las remociones de materia orgánica debido a la demanda de oxígeno disuelto en el reactor de licor mixto.
- A pesar del aumento en la carga contaminante en la etapa 2, el reactor UASB no se muestra afectado en la DQO, manteniendo la carga orgánica de 167,54 a 386,65 mg/L muy similar a la etapa 1, la cual trabajó con menor carga orgánica y 70% de lodo recirculado, variando la DQO de 217,17 a 374,90 mg/L.
- Según los parámetros exigidos en el capítulo IV, Resolución de Octubre de 2010, la depuración de materia orgánica por DQO cumple en las dos etapas del sistema, si se dispone a instalaciones ya existentes. No obstante, solo la etapa 1 puede implementarse en nuevas instalaciones por su contenido DQO menor a 200mg/L.
- La presencia de altos contenidos de nitrógeno total en el efluente, se debe a la falta de compuestos carbonados libres luego de la remoción de materia orgánica, lo que provoca la inhibición en los procesos metabólicos de los microorganismos nitrificantes, de igual manera, la falta de oxígeno disuelto en el licor mixto durante las dos etapas también retrasa la fase oxidativa del nitrógeno.
- La presencia dominante de ciliados nadadores libres en el lodo aerobio permite identificar la existencia de un lodo joven, el cual está sujeto a bajas condiciones en la formación de flóculos. Incluso el tiempo de oxigenación y el TRH expuesto en las dos etapas, obligan a los microorganismos a inhibir sus actividades metabólicas.

## 7. RECOMENDACIONES

- El reactor UASB evidenció un incremento de AGV ocasionado por el aumento de materia orgánica, sin embargo, las remociones del sistema anaerobio no decayeron en ninguna de las dos etapas, por lo cual se recomienda tener control de AI/AP adicionado bicarbonato para evitar inestabilidad y acidificación del medio.
- Realizar cambios al sistema de lodos activados debido a la inhibición en la depuración de materia orgánica que se presentó durante la segunda etapa, debido al aumento del tiempo de retención hidráulico. El aumento del volumen en el sistema de licor mixto, puede ser aconsejable para extender el TRH y en consecuencia la obtención de un lodo más maduro y un incremento en la remoción de MO.
- Debido a la reducción en la etapa 2 de oxígeno disuelto, por mayor consumo en los procesos metabólicos de microorganismos, se presenta en consecuencia un decaimiento del porcentaje de remoción en la MO, de tal manera que es recomendable realizar estudios posteriores en la modificación de la transferencia de oxígeno en el licor mixto.
- Continuar realizando variaciones del TRH en el reactor UASB, a fin de identificar el límite de eficiencia en la remoción de materia orgánica con 100% de lodo recirculado.
- Realizar un pretratamiento para desnitrificar el afluente UPB, el cual presenta altas cantidades de nitrógeno total, a fin de evitar cambios en el volumen del sistema aerobio y posteriormente la sobrecarga de materia orgánica para adquirir compuestos carbonados libres.

## BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA, & WEF. *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (21th ed.). Washington D.C. 2005.

B. Arrojo<sup>1</sup>, F. Omil<sup>1</sup>, 2\*, J.M. Garrido<sup>1</sup> y R. Méndez<sup>1</sup>. Combinación de un filtro anaerobio y un sistema SBR para el tratamiento de las aguas generadas en un laboratorio de análisis de productos lácteos. LA ASOCIACIÓN DE QUÍMICOS E INGENIEROS DEL INSTITUTO QUÍMICO DE SARRIÁ. 2002.

CAJIGAS CERON, Álvaro Andrés, PÉREZ VIDAL, Andrea, TORRES LOZADA, Patricia. Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. 2005. 243 p.

CAJIGAS, Á. A., TORRES, P., RODRIGUEZ, J., & RUEDA SAA, G. Guía de Laboratorio. Ensayos de Sedimentabilidad de lodos. Universidad del Valle , Cali. 2001.

CARLINI, M., & WALZ, D. Problemas operacionales en plantas de tratamiento de. Pontificia Universidad Catolica de Argentina, 2003.

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo. ANAEROBIC REACTORS. BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT SERIES. IWA. 2007. VOL 4.

CARPENTER, P. L. Microbiología. México D.F.: Nueva Editorial Interamericana. 1979.

CARPES, G. Modelado de procesos biológicos en las EDAR. Tecnología del Agua. Núm. 315. 2009. 22-33 p.

CRITES, R., & TCHOBANOGLIOUS, G. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Santafé de Bogotá, Colombia. McGraw Hill Interamericana, S.A, 2000.

CRITES, R., & TCHOBANOGLOUS, G. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. (Vol. II). (E. A. H, Ed.) Santafé de Bogotá. McGraw Hill, 2000.

DAVIS, M. L., & MASTEN, S. J. Ingeniería y Ciencias Ambientales. México McGraw Hill - Interamericana de Editores, S.A. de C.V. 2005.

Diego Alejandro Chalarca Rodríguez, Roberto Mejía Ruiz, Néstor, Jaime Aguirre Ramírez. Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. Junio, 2007. N.o 40. pp. 41-58.

DI MARZIO, W. D. Microbiología de lodos activados: una herramienta retrospectiva y predictiva de la depuración de efluentes. Agua Latinoamerica, 2004. 16-17 p.

Enrique J. La Motta<sup>1</sup>; Eudomar Silva<sup>2</sup>; Adriana Bustillos<sup>3</sup>; Harold Padrón<sup>4</sup>; and Jackeline Luque<sup>4</sup>. Combined Anaerobic/Aerobic Secondary Municipal Wastewater Treatment: Pilot-Plant Demonstration of the UASB/Aerobic Solids Contact System. 2007.

G. Guerra. Raquel, M. González. Silvia, P. Trupiano. Aníbal E. Figueroa. María, Seghezzo. Lucas y M. Cuevas. Carlos. PERFILES DE ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA EN UN REACTOR UASB (REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE Y MANTO DE LODOS) UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS CLOACALES PRE SEDIMENTADOS. Buenos Aires. Universidad Nacional de Salta, Consejo de Investigación-INENCO.

G. LETTINGA 2011, R. C. LEITÃO, S. T. SANTAELLA, A. C. VAN HAANDEL and G. ZEEMAN. The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. 2011.

G. LETTINGA, VAN VELSEN, A. F. M., HOBMA, S. W., de ZEEUW, W. & KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering 22. 1980. 699–734 p.

MAVDT, M. d. Grupo Asesor Ambiental y Civil LTDA. 2010. Retrieved Agosto 2011, from GRUPAAC LTDA: <http://www.grupaac.com/proyecto-de-resolucion-del-mavdt-vertimientos>.

METCALF & EDDY, INC. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. (Vols. I - II). México D.F.: McGraw-Hill, 1996.

METODOLOGIA PARA LA EVALUACION APROXIMADA DE LA CARGA CONTAMINANTE. Agencia de medio ambiente, CIGEA. La Habana. Cuba. Diciembre 1998.

OROZCO JARAMILLO, A. Bioningeniería en aguas residuales. Teoría y Diseño. Bogotá, Colombia: ACODAL. 2005.

OSORIO DUARTE, M. Arranque del reactor anaerobio de flujo pistón número dos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Bucaramanga. 2010.

PÉREZ LIZARAZO, Laura. Estudio a escala de laboratorio de la conversión de un tratamiento terciario a un sistema de lodos activados. 2011.

PTAR UPB. Seguimiento operacional Planta de Tratamiento UPB. Bucaramanga. 2007.

Ramalho, R.S. Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. S.A. 2003.

RAMALHO, R. Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona, España. Editorial Reverté. S.A. 1996.

R.A. Pandey, N.M. Parhad, P. Kumaran. Biological treatment of low temperature carbonization wastewater by activated sludge process—A case study. Volume 25, Issue 12. Water Research. December 1991. Pag 1555–1564.

Romero Rojas, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingenieros. 2 ed. 2002

ROMERO ROJAS, J. A. Acuíquímica. Santafé de Bogotá. Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería. 1996.

ROMERO ROJAS, J. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingenierías. 1999.

Rosa C. Bermúdez, Suyén Rodríguez, Mirna de la C. Martínez, Adis I. Terry  
Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogas. 2003.

SEGHEZZO, Lucas, GUERRA, Raquel G., GONZÁLEZ, Silvia M., TRUPIANO, Aníbal P. , FIGUEROA, María E. y CUEVAS, Carlos M. Perfiles de actividad metanogénica específica en un reactor uasb (reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos) utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados. Buenos Aires 177. 4400 Salta. Argentina.

SHI CAO, Ye and MENG ANG, Chee. Coupled UASB-activated sludge process for COD and nitrogen removals in municipal sewage treatment in warm climate. 2009. 2829 p.

P. GUIMARAES, H. N. S. MELO, P. F. F. CAVALCATI, and A. C. VAN HAANDEL. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND HEALTH. Anaerobic-Aerobic Sewage Treatment Using the Combination UASB-SBR Activated Sludge. Vol. A38. No. 11. 2003. 2633 – 2641 p.

SPERILING, M. V., & LEMOS CHERNICHARO, C. A. Biological wastewater Treatment in warm climate Regions (Vol. Two). London: IWA Publishing, 2005.

VAN HAANDEL, A, FORESTI, E. Fundamentos do Tratamento Anaeróbio. En: Tratamento de Esgotos Sanitarios por Processo Anaeróbio e disposicao controlada no solo. PROSAB. 1998.

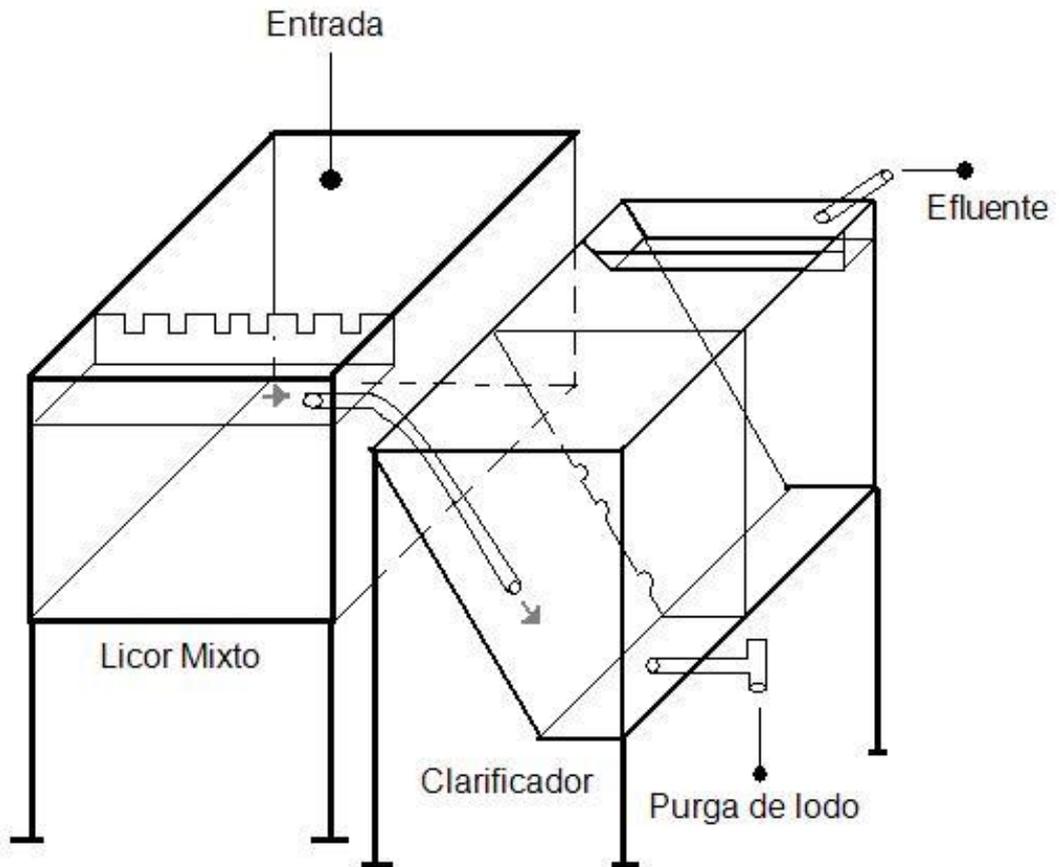
VILASECA V. , M. Observación microscópica de fangos activados en los tratamientos de depuración biológica. Boletín Interxter (U.P.C)(No. 119). 2001. 67-72 p.

Von Sperling, Marcos, Lemos Chernicharo, Carlos Augusto. WASTEWATER CHARACTERISTICS, TREATMENT AND DISPOSAL. BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT SERIES. Vol 1. Publishing LONDON-SEATTLE. IWA. Diciembre 2006.

VON SPERLING, M., FREIRE, V. H. & de LEMOS CHERNICHARO, C. A. Performance evaluation of a UASB-activated sludge system treating municipal wastewater. 2001. 323–328 p.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Esquema sistema aerobio, licor mixto + clarificador.



\*Fuente: Autor

## **Anexo 2.** Ecuaciones de TRH.

*TRH – Etapa1*

$$caudal = \frac{0,00713litros}{segundo}$$

*VolumenUASB = 120litros*

$$TRH = \frac{120litros}{\frac{0,00713litros}{segundo}} \rightarrow 16830,29segundos * \left( \frac{1 \text{ min } uto}{60segundos} \right) = 281 \text{ min } utos$$

*TRH – Etapa2*

$$caudal = \frac{0,01litros}{segundo}$$

*VolumenUASB = 120litros*

$$TRH = \frac{120litros}{\frac{0,01litros}{segundo}} \rightarrow 12000segundos * \left( \frac{1 \text{ min } uto}{60segundos} \right) = 200 \text{ min } utos$$

**Nota:** Los tiempos de retención hidráulicos del sistema aerobio están sujetos a las condiciones al volumen del UASB.

**Anexo 3. condiciones iniciales DQO.**

<b>No. Días</b>	<b>Condiciones Iniciales DQO</b>			
	<b>Remoción de MO mg/L</b>			
	Allave	A.tanque	UASB	Efluente
<b>1</b>	655,4335	518,037	284,357	91,584
<b>2</b>	699,256	556,01	313,567	117,86
<b>3</b>	667,1195	412,881	290,199	79,887
<b>4</b>	658,245	503,432	316,488	88,65
<b>5</b>	561,852	427,486	246,384	120,781
<b>6</b>	564,773	506,353	234,7	117,86

<b>Porcentaje de remoción</b>			
<b>No. Días</b>	<b>A.tanque-Efluente</b>	<b>Salida-UASB</b>	<b>Licor mixto+Clarificador</b>
<b>1</b>	82,32095391	45,1087471	37,21220685
<b>2</b>	78,80253952	43,6040719	35,19846765
<b>3</b>	80,65132568	29,7136463	50,93767938
<b>4</b>	82,39086907	37,1339128	45,25695625
<b>5</b>	71,74620923	42,3644283	29,38178092
<b>6</b>	76,72374806	53,6489366	23,07481145

**Anexo 4.** Datos consignados de Temperatura, pH y Conductividad.

No. Días	Etapa 1			Etapa 2		
	pH			pH		
	Atanque	UASB	Efluente	Atanque	UASB	Efluente
1	7,31	7,69	8,22	8,52	7,63	8,2
2	7,49	7,45	8,1	8,7	7,54	8,02
3	7,78	7,52	7,93	7,7	7,36	8,04
4	7,24	7,31	8,01	7,61	7,29	8,13
5	7,68	7,59	8,06	8,49	7,23	8,06
6	8,48	7,56	8,29	8,31	7,51	8,16
7	7,53	7,33	8,16	7,91	7,65	8,04
8	7,71	7,5	8,17	7,97	7,72	8,41
9	7,85	7,32	8,06	7,96	7,51	8,17
10	8,08	7,51	8,11	7,89	7,29	8,25
11	7,48	7,73	7,95	8	7,88	8,3
12	7,72	7,28	7,99	8,74	8,24	8,28

No. Días	Etapa 1			Etapa 2		
	Temperatura			Temperatura		
	Atanque	UASB	Efluente	Atanque	UASB	Efluente
1	19,4	19,1	20,2	24,8	24,8	24,2
2	22,6	22,2	22,1	25,5	24,3	25,3
3	25,2	26,1	25,2	24,4	24,1	23,1
4	24,3	25,1	25,1	24,4	24,1	23,9
5	25,3	24,8	24,2	24,7	24,3	24,1
6	24,6	23,7	23,1	22,9	23,4	22,7
7	24,6	23,7	23,4	24,4	24,5	23,7
8	23,3	23,8	23,4	24,3	24,3	23,8
9	24	24,8	23,7	23,3	24,1	23,6
10	24,8	23,7	23,1	24,5	24,3	23,5
11	24	25	23,6	24	23,6	22,9
12	25	25,3	24	24,1	24,5	23,4

No. Días	Etapa 1			Etapa 2		
	Conductividad			Conductividad		
	Atanque	UASB	Efluente	Atanque	UASB	Efluente
1	882	1692	1498	1381	1364	1269
2	1102	1554	1587	1362	1578	1220
3	1345	1616	1352	1313	1444	1111
4	1363	1400	1421	1669	1665	1432
5	1481	1367	1289	1374	1643	1280
6	1314	1476	1448	1265	1515	1430
7	1209	1601	1455	1208	1427	1408
8	1563	1683	1459	1267	1460	1421
9	1171	1336	1373	1327	1477	1391
10	1244	1493	1271	1297	1514	1446
11	1391	1431	1368	1186	1041	1048
12	1504	1497	1453	1360	1458	1402

**Anexo 5.** Datos puntuales de porcentaje de materia organica en mg/L con recirculación.

No. Días	Etapa 1		
	Porcentaje de MO con recirculación 70%		
	Atanque-Efluente	Salida UASB	Licor mixto+Clarificador
1	87,22	37,65	49,57
2	82,97	25,53	57,44
3	87,96	49,91	38,05
4	87,47	45,80	41,67
5	86,16	56,99	29,17
6	84,92	50,16	34,76
7	89,22	67,98	21,24
8	87,24	61,12	26,12
9	90,23	72,33	17,90
10	88,56	68,59	19,97
11	90,16	72,73	17,43
12	90,53	76,04	14,49
13	91,58	57,72	33,86
14	90,7	69,31	21,39
15	90,77	72,88	17,89
16	90,95	66,48	24,47

No. Días	Etapa 2		
	Porcentaje de MO con recirculación 100%		
	Atanque-Efluente	Salida UASB	Licor mixto+Clarificador
1	83,15	67,24	15,91
2	85,95	62,19	23,76
3	84,21	64,57	19,64
4	76,30	59,20	17,10
5	78,73	69,62	9,11
6	78,14	66,71	11,43
7	86,23	63,93	22,30
8	79,74	60,00	19,74
9	58,43	35,55	22,88
10	75,38	69,11	6,27
11	80,30	71,98	8,32
12	78,06	75,67	2,39
13	78,89	75,94	2,95
14	83,54	74,40	9,14
15	78,20	77,90	0,30
16	78,90	67,26	11,64

**Anexo 6. Resultados de DQO.**

No. Días	Etapa 1 (0,0071L/seg)			
	DQO			
	Afluyente UPB	Tanque de almacenamiento	UASB	Efluente
1	705,099	465,459	290,199	59,4475
2	640,719	503,432	374,908	85,729
3	339,856	591,062	296,041	71,124
4	445,012	637,798	345,698	79,887
5	404,118	640,719	275,594	88,65
6	480,064	588,141	293,12	88,65
7	339,856	687,455	220,095	74,045
8	500,511	626,114	243,463	79,887
9	345,698	848,11	234,7	82,808
10	529,721	877,32	275,594	100,334
11	404,118	871,478	237,621	85,729
12	538,484	906,53	217,174	85,729
13	477,143	845,189	357,382	71,124
14	494,669	859,794	263,91	79,887
15	380,75	897,767	243,463	82,808
16	404,118	883,162	296,041	79,887

No. Días	Etapa 2 (0,01L/seg)			
	DQO			
	Afluyente UPB	Tanque de almacenamiento	UASB	Efluente
1	497,6725	734,314	240,5805	123,7205
2	538,5735	667,1195	252,2665	100,3485
3	351,5975	728,471	258,1095	114,956
4	439,2425	661,2765	269,7955	155,857
5	500,594	801,5085	243,502	170,4645
6	597,0035	766,4505	255,188	167,543
7	410,0275	877,4675	316,5395	120,799
8	468,4575	783,9795	313,618	158,7785
9	421,7135	599,925	386,6555	249,345
10	547,338	930,0545	287,3245	228,8945
11	348,676	1087,8155	304,8535	214,287
12	363,2835	976,7985	237,659	214,287
13	453,85	696,3345	167,543	147,0925
14	374,9695	734,314	187,9935	120,799
15	325,304	956,348	211,3655	208,444
16	547,338	877,4675	287,3245	185,072

**Anexo 7. Datos consignados de ST, SVT y SFT.**

No. Días	E1			
	Sólidos Volátiles gr		Sólidos Totales gr	
	Efluente	Licor mixto	Efluente	Licor mixto
1	0,0115	0,0109	0,0324	0,0355
2	0,0144	0,0084	0,0329	0,0271
3	0,0164	0,0281	0,0354	0,0543
4	0,0131	0,0283	0,0305	0,0542
5	0,0159	0,0153	0,0335	0,0401
6	0,0135	0,0132	0,0242	0,0379
7	<b>0,0142</b>	0,0146	<b>0,0171</b>	0,0381
8	0,0322	0,0129	0,0505	0,0375
9	0,0323	0,0214	0,0499	0,0441
No. Días	E2			
	Sólidos Volátiles gr		Sólidos Totales gr	
	Efluente	Licor mixto	Efluente	Licor mixto
1	0,0032	0,6054	0,0102	1,1281
2	0,0015	0,4964	0,0033	0,9215
3	0,0125	0,651	0,0319	1,218
4	0,0152	0,7056	0,0258	1,3175
5	0,017	0,3283	0,0357	0,6146
6	0,0168	0,3323	0,0297	0,619
7	0,011	0,305	0,0294	0,5653
8	0,0081	0,421	0,0177	0,6944
9	0,0064	0,02	0,0104	0,0459

**Anexo 8. Índice volumetrico de lodo.**

<b>E1</b>				
<b>No. Muestras</b>	<b>SS - 30 (ml)</b>	<b>SST(mg)</b>	<b>SST/50 (g/ml)</b>	<b>IVL (ml/g)</b>
1	8	0,0319	0,000638	12,539185
2	9,5	0,0315	0,00063	15,0793651
3	10	0,0341	0,000682	14,6627566
4	11	0,0292	0,000584	18,8356164
5	14	0,033	0,00066	21,2121212
6	14,5	0,0235	0,00047	30,8510638
7	18	0,0162	0,000324	55,5555556
8	20	0,0494	0,000988	20,242915
9	11	0,0489	0,000978	11,2474438

<b>E2</b>				
<b>No. Muestras</b>	<b>SS - 30 (ml)</b>	<b>SST (mg)</b>	<b>SST/50 (g/ml)</b>	<b>IVL (ml/g)</b>
1	6	0,01	0,0002	30
2	6	0,0032	6,4E-05	93,75
3	13	0,0309	0,000618	21,0355987
4	11	0,0248	0,000496	22,1774194
5	11	0,0351	0,000702	15,6695157
6	11	0,0287	0,000574	19,1637631
7	7	0,0281	0,000562	12,455516
8	6	0,0167	0,000334	17,9640719
9	6	0,01	0,0002	30

**Anexo 9.** Datos de alcalinidad en el reactor UASB.

No. Días	Etapa 1 en UASB			
	Alcalinidad Total	Bicarbonato	AGV	AI/AP
1	1,45	0,55	0,9	1,64
2	1,7	0,55	1,15	2,09
3	1,4	0,35	1,05	3,00
4	1,5	0,45	1,05	2,33
5	1,45	0,4	1,05	2,63
6	1,6	0,6	1	1,67
7	0,9	0,3	0,6	2,00
8	1,45	0,4	1,05	2,63

No. Días	Etapa 2 en UASB			
	Alcalinidad Total	Bicarbonato	AGV	AI/AP
1	1,45	0,35	1,1	3,14
2	2	0,6	1,4	2,33
3	1,75	0,45	1,3	2,89
4	1,8	0,45	1,35	3,00
5	1,8	0,45	1,35	3,00
6	1,7	0,45	1,25	2,78
7	1,48	0,33	1,15	3,48
8	1,95	0,85	1,1	1,29

**Anexo 10.** Datos de oxígeno disuelto en E1 y E2.

No. días	E1				
	Tanque de almacenamiento	Llave UPB	UASB	Lodos	Efluente
1	0,12	3,56	1,63	3,28	5,59
2	0,07	2,76	0,37	3,88	5,19
3	0,24	3,01	0,21	3,41	3,12
4	1,41	0,38	0,77	3,44	4,24
5	0,1	3,47	0,36	4,87	4,15
6	0,62	2	0,08	4,05	2,87
7	0,06	0,66	0,6	4,57	2,79
8	3,54	0,15	0,23	3,31	3,96
9	0,13	4,21	1,08	4,3	4,33
10	2,81	2,31	0,15	3,9	3,44
11	0,78	3,92	0,74	4,07	2,96

No. días	E2				
	Tanque de almacenamiento	Llave UPB	UASB	Lodos	Efluente
1	0,05	2,47	0,51	2,42	1,29
2	0,25	1,91	1,18	3,51	1,82
3	0,03	2,33	0,11	0,8	2,45
4	0,37	1,86	1,62	2,52	1,59
5	0,42	2,01	1,32	2,89	1,86
6	0,02	1,72	0,11	2,14	1,63
7	0,03	1,49	1,2	2,34	1,75
8	0,19	1,46	1,38	2,68	1,83
9	0,28	1,79	1,39	3,03	2,31
10	0,29	1,81	0,22	4,58	4,45
11	1,23	1,67	0,16	3,46	2,84

## Anexo11: Análisis microbiológico.

### RESULTADOS OBTENIDOS ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

#### METODOLOGÍA:

Se realizó una caracterización cualitativa de dos tipos de lodo; lodo oxigénico tomado del licor mixto dentro del reactor de aireación y lodo anoxigénico proveniente del reactor de flujo ascendente. El objetivo fue determinar la microbiota predominante.

Se llevaron a cabo dos tomas de muestras puntuales los días 15 de noviembre de 2012 y 29 de noviembre de 2012. El número total de muestras analizadas fue de 4 muestras.

La observación de las muestras se realizó con un microscopio compuesto binocular Olympus CH6 de hasta 1000 aumentos. A partir de 250 ml de la muestra tomada, se observaron en promedio cinco gotas (volumen aproximado por gota 0,1 ml). Los microorganismos predominantes se identificaron en vivo y se clasificaron los especímenes hasta género.

#### RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA 1.

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Lodo oxigénico
TIPO DE MUESTREO	Puntual
FECHA TOMA MUESTRA	15 de noviembre de 2012
FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA	15 de noviembre de 2012
TIPO DE ANÁLISIS	Observación directa. Análisis cualitativo.
RESULTADOS OBTENIDOS	
GRUPO TAXONÓMICO	CARACTERÍSTICAS GENERALES
<b>Género Cinetochilum.</b>	Ciliado nadador móvil, del grupo de los Espirotrico, caracterizado por la ciliación somática muy reducida o constituida por cirros. Organismo que se alimenta de bacterias. Población predominante en la muestra observada.
<b>Orden Haptorida sp</b>	Ciliado nadador móvil, de la clase Litostomatea y del orden Haptorida, caracterizado por cuero alargado y ciliación oral. Población predominante en la muestra observada.
<b>Género Euplotes</b>	Protozoo ciliado reptante, clasificado en la clase Espirotrícos y orden Hipotrícos. Presenta cilios modificados para la locomoción sobre sustratos denominados cirros Se alimenta

	de bacterias floculantes. Población abundante en la muestra analizada.
<b>Género Vorticella sp.</b>	Ciliado sésil, clasificado en la clase Oligohimenóforo, peritricos sésiles y pedunculados. Se observaron especies con pedúnculo no contráctil y fino. Se observó poca abundancia de individuos de este género.
<b>Género Opercularia sp.</b>	Ciliado colonial sésil unido al sustrato con pedúnculo no contráctil. Pertenece al grupo de los oligohimenóforos peritricos. Población relativamente abundante en la muestra analizada. Se observó un solo individuo en la muestra analizada.

### REGISTRO FOTOGRÁFICO MUESTRA 1.

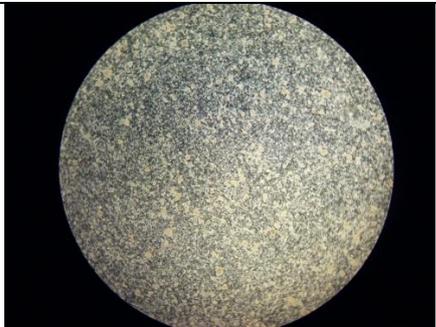
<b>Género Cinetochilum sp.</b> Objetivo 40 x	<b>Orden Haptorida.</b> Objetivo 40 X	<b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 X
		
<b>Género Euplotes sp.</b> Objetivo 40 X		
		

### OBSERVACIONES GENERALES MUESTRA 1.

En la muestra analizada del lodo oxigénico solamente se observaron protozoos del grupo de los ciliados, predominando los ciliados móviles o nadadores libres del género *Cinetochilium* y del orden Haptorida. Se observó menos abundancia de ciliados reptantes. Los ciliados pedunculados son los organismos de menor abundancia en la muestra.

La abundancia de ciliados libres generalmente se presenta bajo condiciones de formación de flóculos.

## RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA 2.

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Lodo anoxigénico
TIPO DE MUESTREO	Puntual
FECHA TOMA MUESTRA	15 de noviembre de 2012
FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA	15 de noviembre de 2012
TIPO DE ANÁLISIS	Observación directa. Análisis cualitativo.
RESULTADOS OBTENIDOS	
CARACTERÍSTICAS GENERALES	REGISTRO FOTOGRÁFICO
NO SE EVIDENCIÓ ORGANISMOS DEL GRUPO DE LOS PROTOZOOS EN LA MUESTA ANALIZADA	

## RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA 3.

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Lodo oxigénico
TIPO DE MUESTREO	Puntual
FECHA TOMA MUESTRA	29 de noviembre de 2012
FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA	29 de noviembre de 2012
TIPO DE ANÁLISIS	Observación directa. Análisis cualitativo.
RESULTADOS OBTENIDOS	
GRUPO TAXONÓMICO	CARACTERÍSTICAS GENERALES
<b>Orden Haptorida sp</b>	Ciliado nadador móvil, de la clase Litostomatea y del orden Haptorida, caracterizado por cuero alargado y ciliación oral. Población predominante en la muestra observada.
<b>Género Cinetochilum.</b>	Ciliado nadador móvil, del grupo de los Espirotrico, caracterizado por la ciliación somática muy reducida o constituida por cirros. Organismo que se alimenta de bacterias. Población presente pero poco abundante.
<b>Género</b>	Protozoo ciliado reptante, clasificado en la clase Espirotrícos y

<b>Euplotes</b>	orden Hipotricos. Presenta cilios modificados para la locomoción sobre sustratos denominados cirros Se alimenta de bacterias floculantes. Población abundante en la muestra analizada.
<b>Género Vorticella sp.</b>	Ciliado sésil, clasificado en la clase Oligohimenóforo, peritricos sésiles y pedunculados. Se observaron especies con pedúnculo no contráctil y fino. Se observó poca abundancia de individuos de este género.

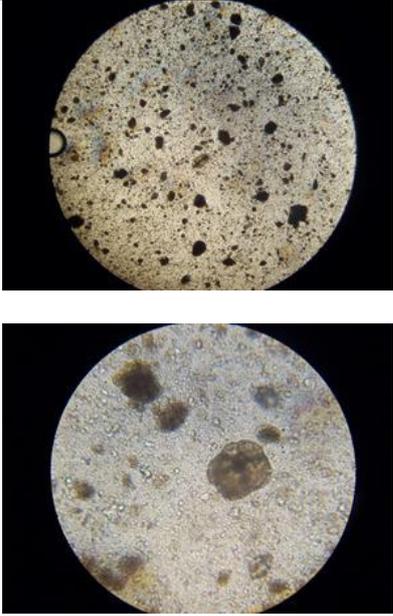
### REGISTRO FOTOGRÁFICO MUESTRA 3.

<b>Género Cinetochilum sp.</b> Objetivo 40 x	<b>Orden Haptorida.</b> Objetivo 40 X	<b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 X
		
<b>Género Euplotes sp.</b> Objetivo 40 X		

Se observó similitud con la muestra 1 en cuanto a la riqueza microbiológica; sin embargo, el género más abundante en esta muestra fue los organismos identificados en el orden Haptorida. Al igual que la muestra anterior predominan los ciliados nadadores libres, seguido de los ciliados reptantes y en menor abundancia los ciliados pedunculares o fijos. Lo anterior indica un lodo en proceso de maduración y formación del flóculo.

### RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA 4.

<b>ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</b>	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Lodo anoxigénico
TIPO DE MUESTREO	Puntual
FECHA TOMA MUESTRA	29 de noviembre de 2012
FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA	29 de noviembre de 2012
TIPO DE ANÁLISIS	Observación directa. Análisis cualitativo.
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	<b>REGISTRO FOTOGRÁFICO</b>

<p><b>NO SE EVIDENCIÓ ORGANISMOS DEL GRUPO DE LOS PROTOZOOS EN LA MUESTRA ANALIZADA</b></p>	 <p>40x</p>
---	---

## CONCLUSIÓN

La comunidad microbiológica evoluciona a medida que el lodo se desarrolla, se estabiliza, madura y envejece y por consiguiente existe una microbiota característica de un lodo joven, de lodos estables y de lodos viejos. Por lo tanto, teniendo en cuenta el análisis cualitativo de las muestras, se puede plantear que el lodo oxigénico analizado es un lodo joven en proceso de formación del flóculo, debido al predominio de ciliados nadadores libres.

No se evidenció organismos del grupo de los protozoarios en las muestras de lodo anoxigénico, debido a la ausencia de oxígeno necesario para el desarrollo de este tipo de organismos ya que la mayoría son heterótrofos oxigénicos y muy pocos anoxigénicos.

**Anexo 12. Contenido de nitrógeno Total.**

<b>Nitrógeno total en mg/L</b>					
<b>Etapas</b>	<b>Afluente UPB</b>	<b>Tanque de almacenamiento</b>	<b>Salida UASB</b>	<b>Licor mixto</b>	<b>Efluente</b>
<b>E1-1</b>	65,4	-	148	139	119
<b>E1-2</b>	203	127	129	116	109
<b>E2-1</b>	111	-	-	73	76
<b>E2-2</b>	164	162	145	132	124

<b>Porcentaje de Nitrógeno total</b>			
<b>Etapas</b>	<b>Afluente UPB - Efluente</b>	<b>Afluente UPB – Salida UASB</b>	<b>Salida UASB – Salida Licor mixto</b>
<b>E1-1</b>	-	-	19,59
<b>E1-2</b>	46,63	36,45	15,50
<b>E2-1</b>	31,53	-	-
<b>E2-2</b>	24,39	11,58	14,48