

**ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DE LA CONVERSIÓN DE  
UN TRATAMIENTO TERCIARIO A UN SISTEMA DE LODOS  
ACTIVADOS**

**LAURA MARGARITA PÉREZ LIZARAZO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DE LA CONVERSIÓN DE  
UN TRATAMIENTO TERCIARIO A UN SISTEMA DE LODOS  
ACTIVADOS**

**LAURA MARGARITA PÉREZ LIZARAZO**

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

**Director:**

**M.Sc. ÁLVARO ANDRÉS CAJIGAS CERÓN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**BUCARAMANGA**

**2011**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bucaramanga, Noviembre 2011

## DEDICATORIA

A Dios, por ser el que me ha orientado y apoyado día tras días en mis decisiones y ha sido él, quién me ha brindado la fortaleza para luchar por mis sueños.

A mis papás, por ser la motivación más grande de mi vida, el amor más desinteresado, porque siempre han estado conmigo con una palabra de aliento que oriente mi camino. Por enseñarme que las cosas más importantes en la vida, están en la familia.

A mi hermana, quien con su respaldo y ejemplo me ha enseñado que la vida es una sola y hay que disfrutarla.

A mi sobrina Sofía, por ser, ese ser lleno de inocencia, que me ha recordado el significado de la palabra amor, amistad y nobleza, el motor de mi vida y mi amiguita favorita.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, la facultad de Ingeniería Ambiental y al cuerpo de docentes, quienes con su esfuerzo y dedicación me brindaron las bases académicas y necesarias para desarrollarme como un profesional integral

A mi director Álvaro Andrés Cajigas, quien vio en mí las aptitudes para desarrollar este proyecto de investigación, sin poner en duda mis capacidades, a su vez por todas sus orientaciones y enseñanzas de vida a lo largo del proceso de formación.

A la profesora Claudia Santoyo, con quien trabaje, quien dedicó su tiempo para la colaboración y orientación de este proyecto.

A la señora Lilia Rodríguez, por su amable colaboración y gestión; para el ingreso y solicitud de pruebas de laboratorio en el Instituto Colombiano del Petróleo –ICP.

Al Laboratorio de Análisis Químico de Aguas, de la Universidad Pontificia Bolivariana, quienes permitieron la elaboración de pruebas físico químicas en sus instalaciones, bajo su orientación y recomendaciones.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	17
1. JUSTIFICACIÓN .....	18
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO REFERENCIAL.....	20
3.1 ANTECEDENTES.....	20
3.2 MARCO CONTEXTUAL .....	21
3.3 MARCO TEÓRICO .....	22
Características de las Aguas Residuales.....	22
Características Físicas del Agua residual .....	24
Características químicas del agua residual .....	25
Características Biológicas del Agua residual .....	28
Tratamiento biológico.....	29
Tratamiento acuático (Plantas acuáticas) .....	36
3.4 MARCO LEGAL.....	40
4. METODOLOGÍA .....	43
Fase 1: Establecimiento de condiciones para la operación del reactor de lodos activados.....	43

Fase 2: Evaluación de la inclusión de buchón de agua ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) para la remoción de nutrientes en el sedimentador del sistema de lodos activados.....	46
Fase 3: Determinación de los parámetros de diseño para el dimensionamiento del sistema de lodos activados.....	47
Fase 4: Dimensionamiento de un sistema de lodos activados tomando como referencia los canales empleados en el sistema terciario PTAR-UPB.....	48
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	50
Fase 1: Establecimiento de condiciones para la operación del reactor de lodos activados (L.A).....	50
Fase 2: Evaluación de la inclusión de Buchón de agua ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) para la remoción de nutrientes en el sedimentador del sistema de lodos activados.....	72
Fase 3: Determinación de los parámetros de diseño, para el dimensionamiento del sistema de lodos activados.....	79
Fase 4: Dimensionamiento de un sistema de lodos activados tomando como referencia los canales empleados en el sistema terciario PTAR-UPB.....	82
6. CONCLUSIONES .....	87
7. RECOMENDACIONES .....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	90
ANEXOS.....	94

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Contaminantes de importancia en aguas residuales. ....	23
Tabla 2. Definiciones para sólidos encontrados en aguas residuales. ....	24
Tabla 3. Identificación de grupos básicos de protozoarios. ....	32
Tabla 4. Descripción del buchón de agua, ( <i>Eichhornia crassipes</i> ). ....	37
Tabla 5. Mecanismos operativos para la remoción de constituyentes de aguas residuales gracias a la utilización de Buchón de agua. ....	39
Tabla 6. Parámetros exigidos por el Decreto 1594 de 1984. ....	41
Tabla 7. Parámetros exigidos en el Proyecto Resolución de Octubre de 2010 ....	42
Tabla 8. Parámetros de caracterización del inóculo. ....	44
Tabla 9. Parámetros de caracterización de sustrato.....	45
Tabla 10. Formato de registro para datos de operación fase 2. ....	47
Tabla 11. Ecuaciones utilizadas para la determinación de constantes cinéticas...48	
Tabla 12. Operación hidráulica del sistema de lodos activados .....50	
Tabla 13. Caracterización del lodo traído del Instituto Colombiano del Petróleo – ICP.....51	
Tabla 14. Valores de DQO en el sistema de lodos activados alimentado con el efluente del RAP de la PTAR-UPB. ....52	
Tabla 15. Valores de DQO en el sistema de lodos activados alimentado con el afluente de la PTAR-UPB. ....53	
Tabla 16. Valores de alcalinidad con la remoción de DQO.....56	
Tabla 17. Valores obtenidos para sólidos totales y sólidos totales volátiles de la fase 1.....57	
Tabla 18. Valores de fósforo obtenidos en la fase 1.....59	
Tabla 19. Valores de nitrógeno obtenidos en la fase 1.....60	
Tabla 20. Valores comparativos con la normatividad. ....61	
Tabla 21. Observaciones seguimiento microbiológico.....62	

Tabla 22. Comportamiento cualitativo de la microbiota con respecto al comportamiento físico-químico del sistema de lodos activados. ....	64
Tabla 23. Parámetros de diseño y operación de un sistema de lodos activados...	66
Tabla 24. Caracterización inóculo FASE 2. ....	71
Tabla 25. Valores típicos del índice volumétrico de lodos y relación alimento/microorganismo de la fase 2. ....	73
Tabla 26. Valores de DQO en la fase 2. ....	73
Tabla 27. Valores de nitrógeno obtenidos en la fase 2. ....	75
Tabla 28. Valores de fósforo obtenidos en la fase 2. ....	75
Tabla 29. Remoción de nutrientes y crecimiento del buchón de agua.....	78
Tabla 30. Datos de la fase 2, usados para la determinación de coeficientes cinéticos.....	80
Tabla 31. Cálculos para la realización de gráficas.....	80
Tabla 32. Dimensiones sistema terciario PTAR-UPB. ....	82
Tabla 33. Condiciones operacionales del sistema de tratamiento de lodos activados –sedimentador. ....	83
Tabla 34. Dimensiones de un sistema de lodos activados en los canales del sistema terciario PTAR-UPB.....	83

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Sistema terciario PTAR – UPB .....	21
Figura 2. Flóculos desarrollados en un sistema de lodos activados. ....	31
Figura 3. Diagrama de predominio relativo. ....	34
Figura 4. Esquema del proceso convencional de lodos activados. ....	35
Figura 5. Buchón de agua, ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) .....	37
Figura 6. Montaje del sistema de lodos activados escala laboratorio. ....	43
Figura 7. Bombas Dosificadoras. ....	44
Figura 8. Prueba de sedimentabilidad del lodo, proveniente del tanque de aireación del sistema de lodos activados. ....	45
Figura 9. Selección de plantas para su traslado al sedimentador del sistema de lodos activados. ....	47
Figura 10. Aclimatación del lodo. ....	50
Figura 11. Comportamiento del sistema de lodos activados alimentado con el efluente del RAP de la PTAR-UPB. ....	52
Figura 12. Comportamiento del sistema de lodos activados, alimentado con el afluente de la PTAR-UPB. ....	54
Figura 13. Flauta de manguera para la distribución homogénea de aire. ....	67
Figura 14. Generación de lama en las paredes del tanque de aireación debido a inconvenientes en la aireación y agitación. ....	67
Figura 15. Agitación y aireación del licor mixto en el tanque de aireación. ....	68
Figura 16. Lodo acumulado en la superficie del Sedimentador. ....	69
Figura 17. Ubicación de pantalla en el sedimentador. ....	69
Figura 18. Buchón de agua adaptado y reproduciéndose en las condiciones de operación del sistema de lodos activados-sedimentador. ....	72

Figura 19. Comportamiento de la remoción del Nitrógeno. Comparación Fase 1 – Fase 2.....	74
Figura 20. Comportamiento de la remoción del fósforo. Comparación Fase 1 – Fase 2.....	76
Figura 21. Actividades de mantenimiento y cosecha del buchón de agua.....	77
Figura 22. Obtención de $k$ y $K_s$ .....	80
Figura 23. Obtención de $Y$ y $K_d$ .....	81

## LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo 1. Caracterización planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. ....	94
Anexo 2. Ecuaciones para el diseño de un proceso de lodos activados. ....	96
Anexo 3. Características de operación del sistema de lodos activados-sedimentador. ....	98
Anexo 4. Resultados obtenidos de pH y alcalinidad fase 1. ....	99
Anexo 5. Valores de DQO y DBO fase 1 y 2. ....	100
Anexo 6. Valores de IVL y relación A/M de la fase 1 y 2. ....	101
Anexo 7. Seguimiento Microbiológico. ....	102
Anexo 8. Resultados cálculos fase 1. ....	113
Anexo 9. Resultados obtenidos fase 2. ....	115

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

<b>TITULO:</b>	ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO DE LA CONVERSIÓN DE UN TRATAMIENTO TERCIARIO A UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS
<b>AUTOR (ES):</b>	LAURA MARGARITA PÉREZ LIZARAZO
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Ingeniería Ambiental
<b>DIRECTOR (A):</b>	ÁLVARO ANDRÉS CAJIGAS CERÓN

### RESUMEN

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana – seccional Bucaramanga por el crecimiento de la comunidad ha sobrepasado su capacidad, haciendo ineficiente la remoción de materia orgánica; adicionalmente presenta concentraciones de nitrógeno y fósforo por encima del marco típico de las aguas residuales domésticas que no alcanzan a removerse; siendo necesario optimizar los procesos de tratamiento.

El presente proyecto estudia la posibilidad de conversión del sistema terciario actual de la Planta en un sistema de lodos activados con la aplicación de planta acuáticas (*Eichhornia crassipes*) en el sedimentador. El sistema propuesto resultó ser una alternativa capaz de funcionar como único tratamiento; sin embargo, no se comprueba la eficiencia del sistema para la remoción de nitrógeno.

Durante el ensayo se efectuaron pruebas de DQO, DBO, Sólidos, Nitrógeno y Fósforo; simultáneamente se realizó seguimiento microbiológico para establecer la madurez del lodo, se monitorearon las condiciones de aireación y suministro de alimento, garantizando un ambiente rico en oxígeno y sustrato para la microbiota presente en el tanque de aireación.

El tratamiento con lodos activados-sedimentador es posible llevarlo a cabo en los canales del sistema terciario de la Universidad, haciendo uso de 62 m para el tanque de aireación y los 66 m restantes para sedimentación en conjunto con las plantas acuáticas, siendo probable el aumento de los porcentajes de remoción.

Al mantener las condiciones de operación, estables y controladas, tales como el sistema de aireación, recirculación del lodo, agitación, condiciones eléctricas y cosechamiento del buchón de agua entre otras actividades de mantenimiento, el sistema alcanzaría remociones del 93% de DQO, 85% de nitrógeno y 63% de fósforo, convirtiéndolo en una alternativa viable.

**PALABRAS CLAVES:** *Eichhornia crassipes*, Lodos activados, microorganismos del lodo activado

## GRADUATION PROJECT ABSTRACT

**TITLE:** LABORATORY SCALE STUDY OF THE CONVERSION OF A TERTIARY TREATMENT TO AN ACTIVATED SLUDGE SYSTEM

**AUTHOR:** LAURA MARGARITA PÉREZ LIZARAZO

**FACULTY:** ENVIRONMENTAL ENGINEERING

**DIRECTOR:** ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON

### ABSTRACT

Community growth inside Universidad Pontificia Bolivariana at Bucaramanga, has overcome the wastewater treatment plant capacity, dealing with maximum flow levels which, in turn, overload the system making it inefficient, as nitrogen and phosphorus concentration of the water discharged is above usual for domestic water. For this reason, it has been necessary to optimize the treatment process using the same infrastructure.

Through this project, the possibility to convert the current tertiary wastewater treatment plant to an activated sludge system with a sedimentator using *Eichhornia crassipes* is studied, which results in an alternative that could be used as a unique treatment for the abovementioned University.

A physical - chemical tracing was carried out for 95 days, taking laboratory tests such as DQO, DBO, solids, nitrogen and phosphorus at specific frequencies. Simultaneously, a microbiological tracing was performed, which allowed to establish that sludge maturity depends on constant and efficient aeration conditions as well as feed supply, what provides a suitable environment for present microbiota in the aeration tank.

Activated sludge treatment may take place in the tertiary system channels of the wastewater treatment plant, using 62 m of channel for the aeration tank and the remaining 66 m for the sedimentator in conjunction with aquatic plants, in order to

obtain a contact area amongst plants and water to be treated of 60 m<sup>2</sup>, thus increasing the percentage of nutrient removal.

If operating conditions such as aeration system, sludge recirculation, agitation, electrical conditions and harvesting *Eichhornia crassipes*, remain stable and under control, the system could reach 93% COD, 85% nitrogen and 63% phosphorus removal.

**Key words:** *Eichhornia crassipes*, activated sludge, activated sludge microorganisms

## INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes sobre la tierra; Colombia cuenta con 6 grandes cuencas y un sistema hidrográfico que atraviesa el país de norte a sur (Mira, 2007), proporcionando calidad de vida y mejorando las condiciones económicas de la población, éstas fuentes superficiales llevan alimento, posibilidades de trabajo y estilos de vida permitiendo el progreso de comunidades.

El agua para consumo humano es uno de los factores más preocupantes de los gobiernos actualmente, las fuentes superficiales aptas para abastecimiento de agua potable de comunidades son muy pocas y no están en condiciones apropiadas, representando un riesgo para la salud humana, aumentando la generación de enfermedades respiratorias, dengue, cólera entre otras de carácter tropical, a causa de los vertimientos no controlados de origen doméstico e industrial en los sectores más poblados.

Gracias al desarrollo técnico de cada uno de los países y a la preocupación del uso inadecuado del recurso, se han implementado plantas de tratamiento de aguas residuales eficientes, buscando prevenir y mitigar los daños causados por las diferentes actividades que desarrolla el hombre.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben contar con sistemas efectivos asegurando la calidad de agua; es importante realizar diseños adecuados con el fin de lograr eliminación de los contaminantes, ajustándose a la normatividad, mediante el cumplimiento de valores permisibles. La evaluación constante de estos tratamientos y su optimización es sumamente importante, permitiendo aumentar eficiencias en las mismas condiciones de espacio y proveer mejores resultados donde los costos pueden ser un impedimento importante.

La Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga no es ajena a este compromiso, por ello, con este trabajo se evaluó a escala laboratorio, la posibilidad de implementar, bajo las condiciones estructurales del sistema terciario actual del campus universitario, un tratamiento de lodos activados usando buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) en el sedimentador, como alternativa de mejorar la condición de nutrientes en el agua.

El aprovechamiento del espacio existente, con la implementación de un nuevo sistema de tratamiento podría aumentar los porcentajes de remoción, cumplimiento de la normatividad y a su vez se optimizaría el tratamiento de las aguas residuales en la Universidad sin aumentar considerablemente los costos, cómo se tendrían con la construcción de una nueva planta.

## 1. JUSTIFICACIÓN

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales está compuesta por: sistema preliminar, trampa de grasas, dos reactores anaerobios flujo pistón- RAP y sistema terciario con buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), en la actualidad maneja caudales que sobrecargan el sistema, haciéndolo ineficiente y presentando fallas operacionales.

El vertimiento líquido de la Pontificia, según el laboratorio de análisis químico de la UPB (Anexo 1) entra al sistema con concentraciones de 1285 mg/L de O<sub>2</sub> en DQO y 927 mg/L de O<sub>2</sub> en DBO<sub>5</sub>, pH superiores a 8.5 unidades. Los reactores anaerobios logran remociones de 28.40% en DQO y 57.07% en DBO<sub>5</sub>, El sistema terciario alcanza 20.33% y 51.01%, en los mismos parámetros, las remociones totales del sistema en términos de DQO y DBO<sub>5</sub> son de 47.32% y 64.59% respectivamente, valores que se encuentran por debajo del límite de cumplimiento exigido en la normatividad Colombiana.

La condición ineficiencia en la PTAR, se presenta por las altas concentraciones de nitrógeno del afluente superiores a 187.82 mg/L, según Osorio en estudios realizados para la planta del campus en 2010, estos valores están por encima de las concentraciones típicas para Colombia (entre 30 y 100 mg/L) recomendadas por Romero, 1999. Las concentraciones del afluente de nitrógeno, tienden a la formación predominante de nitrógeno amoniacal no iónica (NH<sub>3</sub>), que resulta tóxica y causan inhibición por nitrógeno para los sistemas anaerobios según Chernicharo, 2006. El nitrógeno adicionalmente satura el sistema terciario, por lo tanto, se debe contar con un sistema de tratamiento más efectivo para el nitrógeno, donde se pueda controlar y/o trabajar con estas concentraciones.

El funcionamiento actual de la PTAR-UPB, al no ser tan eficiente y constante en sus remociones, incumple la normatividad de vertimientos, con riesgo de ser sancionada por parte de los entes reguladores de la región. Siendo necesario la implementación de mejoras en su diseño que proporcionen remociones significativas.

La alternativa de un reactor de lodos activados empleando plantas acuáticas en el sedimentador como buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), resulta ser una opción que favorecería tanto la remoción de material orgánico (reactor aireado) como la remoción de nitrógeno (sedimentador). Estas reformas se pueden llevar a cabo en la infraestructura correspondiente del sistema terciario actual de la PTAR-UPB. Con esta optimización del sistema se aseguraría un tratamiento de los residuos líquidos más eficiente y a su vez reducir costos de operación, mantenimiento y construcción.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la posibilidad de convertir una fracción del tratamiento terciario PTAR–UPB en un sistema de lodos activados, (Reactor Aireado – Sedimentador) a escala laboratorio.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las condiciones de operación de un reactor de lodos activados, tratando agua residual proveniente del Reactor Anaerobio PTAR–UPB.
- Evaluar la inclusión del Buchón de Agua (*Eichhornia crassipes*) para la remoción de nutrientes en el sedimentador del sistema de lodos activados.
- Determinar a escala laboratorio los parámetros de diseño necesarios para el dimensionamiento de un sistema de lodos activados a escala real.
- Dimensionar un sistema de lodos activados tomando como referencia los canales empleados en el sistema terciario PTAR–UPB.

### 3. MARCO REFERENCIAL

#### 3.1 ANTECEDENTES

El sistema de lodos activados fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Arden y Lockett. Este proceso de tratamiento busca la formación de un floc biológico en un tanque de aireación, esta masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos, poseen una superficie activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, haciendo posible la remoción posterior de estos en la sedimentación (Romero Rojas J. , 1999).

Este tipo de tratamiento no se ha evaluado en la PTAR – UPB, a lo largo de su funcionamiento se ha trabajado con un sistema de reactores a flujo pistón – RAP (Osorio Duarte, 2010), complementado con un sistema de tratamiento acuático como terciario (Camacho P & Ordoñez N, 2008). El conjunto de estos dos sistemas ha sido evaluado y monitoreado, asegurando que las condiciones operacionales de dichos sistemas se complementan logrando remociones significativas de nitrógeno amoniacal, fósforo total, coliformes totales y fecales con el fin de disminuir los impactos en la fuente receptora (Gamarra H, Forero S, Quintero H, Rueda V, & Aguilar A, 2005). Sin embargo, la PTAR actualmente bajo las condiciones operacionales, de diseño y capacidad, logra remociones promedio de 42.96% y 78.96%, en DQO y DBO<sub>5</sub> respectivamente, incumpliendo con el Decreto 1594 de 1984.

El sistema de tratamiento de lodos activados convencional, está enfocado para aguas residuales de tipo doméstico y en especial logra remociones significativas de DBO y baja en cuanto a nutrientes. Por tal motivo se combinan con otros procesos para lograr mejores resultados.

La investigación permanente de estos sistemas ha permitido establecer condiciones de operación y constantes cinéticas del reactor para cada caso en particular, adicionalmente el monitoreo constante del sistema hace posible la optimización del mismo y la atención oportuna en momentos de desestabilización que lo requiera (Finamore , Blanco, & López, 1999).

Las constantes cinéticas obtenidas por diferentes investigadores en trabajos con sistema de lodos activados a escala laboratorio, han demostrado ser muy variadas y presentan un amplio rango donde cada resultado aporta a las especificaciones necesarias para cada tipo de reactor (Metcalf & Eddy, Inc, 1996). Esta experiencia le permitirá a la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, puntualizar sobre el diseño y adecuación de un sistema de lodos activados con sedimentador secundario bajo las condiciones estructurales existentes en el

sistema terciario, buscando la optimización del proceso de tratamiento de sus aguas residuales.

### 3.2 MARCO CONTEXTUAL

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana – PTAR UPB, lleva funcionando más de 10 años, cuenta con sistema preliminar para la remoción de material sólido, compuesto por rejillas, trampa de grasas y desarenador. Un reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP) como sistema secundario.

Como sistema de tratamiento terciario se cuenta con canales cuya profundidad promedio es de 1 m, ancho de 0.9 m y una longitud total aproximada de 127.95 m. El agua residual proviene de un tanque de almacenamiento el cual recibe el efluente del sistema secundario. El flujo de agua a través de los canales posee vertederos triangulares generando pequeñas caídas donde se aprovecha para transferencia de oxígeno y se obtiene un mejor comportamiento hidráulico a lo largo de la estructura. (Figura 1)

**Figura 1.** Sistema terciario PTAR – UPB



Fuente: Autor

El tratamiento terciario cuenta con *Eichhornia crassipes* comúnmente conocida como buchón de agua. Esta planta acuática se encarga de las remociones de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes presentes en las aguas residuales. El buen funcionamiento del tratamiento se atribuye a la simbiosis generada entre el sistema radicular de las plantas acuáticas y la actividad biológica desarrollada por el lodo presente en los canales.

Sin embargo esta eficiencia disminuye en el momento en el que se realizan labores de mantenimiento y lavado de los canales, es decir cuando se remueve el lodo (PTAR UPB, 2007).

### **3.3 MARCO TEÓRICO**

Las aguas residuales domésticas (ARD), son aquellas provenientes de viviendas, edificios o institucionales donde se desarrollan actividades cotidianas con fines higiénicos, tales como baños, cocinas, lavados, los cuales consisten básicamente en residuos humanos, las aguas residuales municipales (ARM), son aquellos residuos transportados por el alcantarillado y corresponde a los desechos de una ciudad o población y en su mayoría son tratados en plantas de tratamiento municipales, igualmente existen aquellos aguas residuales provenientes de actividades de la industria manufacturera con una composición variable según su tipo de producción (Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones., 2000).

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

La caracterización de aguas residuales debe comprender un riguroso programa de muestreo donde se asegure la representatividad de las muestras, y un análisis de laboratorio respaldado por los métodos estándar de medición que brinden exactitud y precisión en cada uno de los resultados. (Romero Rojas J. , 1999)

Los programas de muestro se desarrollan con el fin de obtener: (Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones., 2000)

1. Datos operacionales de rutina sobre el desempeño general de la planta.
2. Datos que puedan documentar el desempeño de un determinado proceso u operación.
3. Datos que puedan usarse para la implementación de nuevos programas propuestos.
4. Datos para reportar el cumplimiento de la norma.

Para cumplir con el muestreo según Crites & Tchobanoglous (2000), se debe asegurar que los datos tomados sean:

1. Representativos: Los datos deben representar el agua residual o el ambiente muestreado.
2. Reproducibles: Los datos obtenidos deben poder ser reproducidos por otros siguiendo el mismo muestreo y protocolos analíticos.

3. Sustentados: La documentación debe estar disponible para validar el plan de muestreo. Deben tener un grado de exactitud y precisión.
4. Útiles: Los datos deben permitir cumplir el objetivo del plan de monitoreo.

Las características de las aguas residuales varían según su origen y la magnitud del caudal aportante, por lo que las cargas equivalentes o contribuciones per cápita varían de una ciudad a otra y de un país a otro; sin embargo en términos generales se puede definir ciertos componentes fundamentales clasificados como físicos, químicos y biológicos, donde los parámetros más representativos para el manejo y diseño de las plantas de tratamiento son los sólidos suspendidos, los compuestos biodegradables y los organismo patógenos. (Romero Rojas J. , 1999)

En cuanto a las instituciones, se consideran como generadoras de aguas residuales domésticas debido a que su composición, hace referente a una composición típica, cuyos componentes principales son sólidos, nitrógeno, fósforo, materia orgánica y coliformes. (Orozco Jaramillo, 2005)

La importancia del tratamiento de las aguas residuales son los impactos que estas generan en los cuerpos receptores y a todo aquello que dependa de ellos. En la tabla 1, se encuentran los contaminantes más importantes en el manejo de las aguas residuales, sus impactos ambientales y sus parámetros de medición. (Romero Rojas J. , 1999)

**Tabla 1.** Contaminantes de importancia en aguas residuales.

Contaminante	Parámetro típico de medida	Impacto ambiental
Materia orgánica biodegradable	DBO, DQO.	Desoxigenación del agua, generación de olores indeseables.
Materia suspendida	SST, SSV.	Causa turbiedad en el agua, deposita lodos.
Amoniaco	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	Desoxigena el agua, es tóxico para organismos acuáticos y puede estimular el crecimiento de algas.
Fósforo	Ortofosfatos	Puede estimular el crecimiento de algas.
Energía térmica	Temperatura	Reduce la concentración de saturación de oxígeno en el agua, acelera el crecimiento de organismos acuáticos.
Iones de hidrógeno	pH	Riesgo potencial para organismos acuáticos.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

## Características Físicas del Agua residual

Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. (Metcalf & Eddy, Inc, 1996)

**Sólidos:** Se clasifican como toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos, como materia sólida. La clasificación de los diferentes tipos de sólidos se encuentra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Definiciones para sólidos encontrados en aguas residuales.

Prueba	Descripción
Sólido totales (ST)	Residuo remanente después de muestra evaporada y secada a una temperatura específica (103 a 105 °C)
Sólidos volátiles totales (SVT)	Sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los sólidos totales son calcinados a (500 ± 50 °C)
Sólidos fijos totales (SFT)	Residuo que permanece después de incinerar los sólidos totales (500 ± 50 °C)
Sólidos suspendidos totales (SST)	Fracción de sólidos totales retenidos sobre un filtro con un tamaño de poro específico, medido después de que ha sido secado a una temperatura específica.
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	Sólidos volatilizados e incinerados cuando los sólidos suspendidos totales son calcinados a (500 ± 50 °C)
Sólidos sedimentables	Sólidos suspendidos, expresados como mililitros por litros, que sedimentarán por fuera de la suspensión dentro de un periodo de tiempo específico.

Fuente: CRITES & TCHOBANOGLIOUS, Tratamiento De Aguas Residuales En Pequeñas Poblaciones., 2000.

La determinación de sólidos volátiles se interpreta en materia orgánica teniendo en cuenta que a 500 ± 50 °C la materia orgánica se oxida a una velocidad razonable formando CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, compuestos que se volatilizan, los sólidos sedimentables son claves, con el fin de establecer la necesidad de diseño de clarificadores como unidades de tratamiento en un sistema de lodos activados, así como para controlar su eficiencia (Romero Rojas J. A., 1996).

En cuanto a la determinación de sólidos en lodos es importante conocer los sólidos totales y volátiles ya que indirectamente son la cantidad de microorganismos y biomasa presente en el lodo, estos se deben relacionar con la determinación del Índice Volumétrico del lodo (IVL), el cual indica la

sedimentabilidad del lodo, parámetro que permite el control de operación de procesos y para prevenir ciertas dificultades de operación, al igual es un patrón de diseño para sistemas como el de lodos activados (Cajigas, Torres, Rodriguez, & Rueda Saa, 2001).

El Índice volumétrico de lodo - I.V.L., representa el volumen específico del lodo. Lo ideal es que su valor esté entre 40 y 140 ml/g (Carlini & Walz, 2003), este valor tiende a variar según las concentraciones del lodo que se manejen en el tanque de aireación, por ello resulta ser un parámetro de difícil y cuidadosa interpretación (Ramalho, 1996).

**Temperatura:** La temperatura del agua residual es por lo general, mayor que la temperatura del agua para el abastecimiento, como consecuencia de la incorporación del agua caliente proveniente del uso doméstico o industrial. Este es un parámetro importante, ya que muchos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales involucran procesos biológicos que dependen de ella.

Es un factor que afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, así mismo como el crecimiento y adaptación de la población microbiana, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos (Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones., 2000).

### **Características químicas del agua residual**

Las características químicas de las aguas residuales se abordan según Metcalf & Eddy, Inc (1996), teniendo en cuenta cuatro aspectos de importancia.

1. La materia orgánica.
2. La medición del contenido orgánico.
3. La materia inorgánica.
4. Los gases presentes en el agua residual.

Los constituyentes químicos de las aguas residuales son clasificados en su mayoría de ocasiones como inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos, incluyen elementos individuales, una amplia variedad de compuestos como nitratos y sulfatos. Los constituyentes orgánicos, están conformados por una variedad de compuestos que no pueden ser distinguidos de forma separada, pero son de suma importancia en el tratamiento, vertimiento y reutilización de las aguas residuales.

Entre los constituyentes orgánicos presentes en el agua residual en su mayoría están formados por proteínas, carbohidratos, grasas y aceites, aparte contiene gran número de moléculas orgánicas sintéticas (Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones., 2000).

En cuanto a los parámetros químicos a tener en cuenta en la caracterización y seguimiento de tratamientos de aguas residuales son los siguientes:

**Alcalinidad:** Se define como la capacidad para neutralizar ácidos, reaccionar con iones de hidrógeno, aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas ( $\text{OH}^-$ ). Suele tomarse como una indicación de la concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (Romero Rojas J. A., 1996).

Las aguas residuales domésticas son generalmente alcalinas, concentraciones de 50 – 200 mg/L, de  $\text{CaCO}_3$  son comunes. Su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir cambios bruscos de pH, las hace importante en el tratamiento químico de las aguas residuales, en los procesos de remoción biológica de nutrientes, en la remoción de amoníaco y en tratamientos anaerobios (Romero Rojas J. A., 1996).

**pH:** Es la expresión usual para medir la concentración del ion hidrógeno en una solución. Esta concentración en el agua, está íntimamente relacionada con la extensión de la reacción de disociación de las moléculas del agua, ya que esta se disocia en los iones hidroxilo e hidrogeno.

El intervalo de pH adecuado para la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho, en general pH entre 5 y 9 unidades. Las aguas residuales con pH menores a 5 y superiores a 9 unidades, son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos. Si el pH del agua residual tratada no es ajustada antes de ser vertido, el pH de la fuente receptora puede ser alterado; por ello, la mayoría de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser descargados dentro de los límites específicos de pH (Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones., 2000).

**Nutrientes:** Los nitratos y fosfatos procedentes de las aguas residuales son nutrientes inorgánicos que favorecen el crecimiento de plantas y algas. Las cantidades necesarias para generar floraciones algáceas no están bien establecidas, pero concentraciones tan bajas como 0,01 mg/L de fósforo y 0,1mg/L de nitrógeno, son suficientes para ocasionar eutrofización cuando otros elementos se encuentran en exceso (Glynn & Gary M).

La eutrofización es un proceso natural de envejecimiento de los lagos, progresa aún sin tener ayuda del hombre, sin embargo la contaminación acelera el envejecimiento natural y acorta considerablemente la vida del receptor acuático (Ramalho, 1996). Resulta ser un desbalance en dirección opuesta, con una excesiva producción de organismos fotosintéticos que al cumplir su ciclo de vida y morir se convierten en nutriente orgánicos ejerciendo una demanda de oxígeno sobre la corriente acuática. También es indeseable debido a la proliferación de algas, quienes limitan la luz para muchas de ellas, por lo tanto al existir ausencia de esta, se ven obligadas a utilizar el oxígeno como fuente de energía causando

una desoxigenación en la corriente y daños severos al ecosistema (Winkler, 1993).

En estos nutrientes se ven reflejados elementos como el nitrógeno y fósforo, gracias a su función reguladores del crecimiento de plantas y protistas se les conoce como bioestimuladores y son elementos básicos para la síntesis de proteínas (Metcalf & Eddy, Inc, 1996). Sin embargo el exceso de estos resulta ser perjudicial para los ecosistemas.

**Nitrógeno:** Las formas de interés en aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos y nitratos. Todos son formas interconvertibles bioquímicamente y componentes del ciclo del nitrógeno. Se denomina nitrógeno total Kjeldhal (NTK), al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal. Los datos del nitrógeno, son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales por tratamientos biológicos. Cuando se exige control de eutrofización de las fuentes receptoras, la remoción de nitrógeno resulta ser una condición importante del tratamiento (Romero Rojas J. A., 1996).

Las aguas residuales domésticas contienen del orden de 10 a 25 mg/L de nitrógeno amoniacal expresado como N, para el proceso de lodos activados se debe controlar que el nitrógeno amoniacal no supere 1600 mg/L, ya que es una concentración inhibitoria para muchos de los microorganismos existentes en este tratamiento (Romero Rojas J. A., 1996).

- **Fósforo:** Debido a que en aguas superficiales tienen lugar nocivas proliferaciones incontroladas de algas, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de compuestos de fósforo que alcanzan las aguas superficiales por medio de vertidos de aguas residuales domésticas, industriales y a través de la escorrentía natural (Metcalf & Eddy, Inc, 1996).

En aguas residuales domésticas el contenido de fósforo oscila entre 6 y 20 mg/L; las formas usuales son los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos (Romero Rojas J. , 1999).

El uso de detergentes es una de las principales causas de la generación del fósforo en las aguas residuales domésticas, ya que estos contienen grandes cantidades de este nutriente y han contribuido al incremento del mismo en las fuentes receptoras (Romero Rojas J. A., 1996).

**Oxígeno disuelto:** Gas de baja solubilidad en el agua, requerido para la vida acuática aerobia. La baja disponibilidad de oxígeno disuelto (OD), limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las aguas residuales para su disposición en ríos y embalses. La concentración de saturación de oxígeno disuelto es función de la temperatura, la presión atmosférica y la salinidad del agua.

El suministro de oxígeno y las concentraciones de oxígeno disuelto en tratamientos biológicos aerobios y aguas receptoras de aguas residuales son aspectos de mucha importancia en el diseño, operación y evaluación de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

La cantidad de oxígeno que se transfiere al agua residual, en un tanque de aireación en un proceso de lodos activados, debe ser suficiente para satisfacer la demanda de la masa microbial existente en el sistema de tratamiento y para mantener un residual de oxígeno disuelto generalmente del orden de 2 mg/L (Romero Rojas J. , 1999).

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias durante la estabilización de la materia orgánica susceptible de descomposición, en condiciones aeróbicas. Cuando se habla de, susceptible de descomposición, se hace referencia a que la materia orgánica puede servir de alimento a las bacterias y que su oxidación genera energía, en un periodo de incubación de 5 días a 20°C (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001). Es uno de los parámetros más importantes para la determinación de materia orgánica en las aguas residuales, al igual que para determinar el poder contaminante de los residuos generados.

Los resultados de la DBO ayudan a determinar el tamaño de ciertas unidades tales como filtros percoladores y lodos activados; también sirven como parámetro de evaluación durante la operación de las plantas de tratamiento, eficiencia de los diferentes procesos y fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras. (Romero Rojas J. , 1999)

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es un parámetro analítico, de polución que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por una porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte (Romero Rojas J. A., 1996).

Las aguas residuales domésticas crudas tienen DQO promedio de 250 a 1000 mg/L.

La cantidad de oxígeno consumido en la oxidación química es mucho más grande que la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación biológica. La comparación de estos dos, da una gran idea de la biodegradabilidad de la muestra. Generalmente la relación DQO/DBO para aguas domésticas debe ser entre 1,2 y 2,5 (Romero Rojas J. , 1999).

### **Características Biológicas del Agua residual**

Los principales organismos encontrados en las aguas residuales son microorganismos, los cuales realizan actividades ambientales esenciales como

captar energía del sol y ejecutar etapas de los ciclos de carbono, del oxígeno, del nitrógeno y otros elementos indispensables para la biota. Su importancia radica en su existencia en residuos humanos, en su patogenicidad, uso como indicador de contaminación y en su función como ejecutores de tratamientos biológicos (Romero Rojas J. , 1999).

### **Tratamiento biológico**

El principio básico de la depuración biológica se fundamenta en un proceso físico - biológico, la biofloculación o bioadsorción y en un aspecto exclusivamente biológico como es el metabolismo bacteriano (Di Marzio, 2004). La aplicación de este tipo de tratamiento para aguas residuales supone la remoción de contaminantes mediante actividad biológica. En todo proceso biológico los microorganismos se desarrollan de manera apropiada si se les provee las condiciones esenciales, según Romero Rojas (1999), estas son: nutrientes suficientes, ausencia de compuestos tóxicos y condiciones ambientales apropiadas.

Los 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 el agua residual doméstica, el principal objetivo es la reducción de la materia orgánica presente y en muchos casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, en otros, la eliminación de compuestos a nivel de trazas que puedan resultar tóxicos y finalmente la estabilización de lodos.

Se debe tener presente que todos los procesos biológicos que se emplean en el tratamiento de aguas residuales, tienen su origen en fenómenos y procesos que se producen en la naturaleza. La descomposición de los residuos se puede acelerar mediante el control del ambiente y el entorno de los microorganismos. El proceso de tratamiento biológico consiste en el control del medio de los microorganismos, de modo que se consigan las condiciones de crecimiento óptimas (Metcalf & Eddy, Inc, 1996).

Existen cuatro grupos principales de procesos biológicos: procesos aerobios, anóxicos, anaerobios y combinados. Dentro de cada grupo hay, además, diferentes tipos, dependiendo, si el proceso es de crecimiento biológico suspendido, crecimiento biológico adherido o una combinación de ellos.

Los procesos aerobios, se basan en un proceso de respiración de oxígeno en el cual, el oxígeno libre es el único aceptor final de electrones, éste es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica e inorgánica (Romero Rojas J. , 1999).

**Sistema de Lodos Activados:** La aplicación de uso más extendido del crecimiento biológico en suspensión es el sistema de lodos activados, el cual

consiste en la suspensión de una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos, los cuales tienen la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a lo cual se debe su nombre de activado. El resultado final es una porción de materia orgánica, susceptible de descomposición biológica, convertida en compuestos inorgánicos y el resto, transformada en lodo activado adicional (Davis & Masten, 2005).

El principio de funcionamiento de un sistema de lodos activados se manifiesta así: Las aguas residuales crudas fluyen en el tanque de aireación con su contenido de materia orgánica (DBO) como suministro alimenticio.

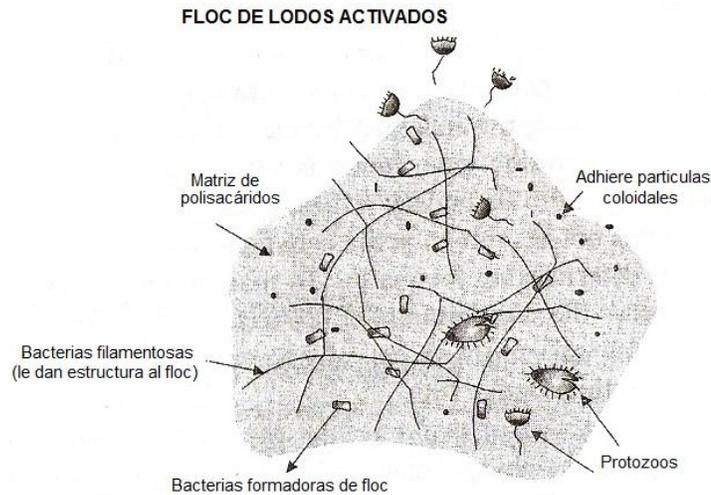
Las bacterias metabolizan los residuos produciendo nuevas bacterias, utilizando oxígeno disuelto proveniente de la aireación y liberando dióxido de carbono. Los protozoos consumen bacterias para obtener energía y reproducirse. Una porción del crecimiento bacteriano muere, liberando su contenido celular en la solución para una nueva síntesis en células microbianas (Romero Rojas J. , 1999). La aireación tiene por finalidad suministrar al cultivo microbiano el oxígeno requerido para el desarrollo de los procesos bioquímicos necesarios para una óptima degradación de la materia orgánica (Carpes, 2009).

La sedimentación de los sólidos (biomasa), lo cual clarifica el efluente, ocurre en el tanque de sedimentación secundario. En el momento en el que los sólidos sedimentan en el tanque sedimentador, son recirculados hacia el reactor, con el propósito de mantener la concentración de la biomasa. La biomasa es separada en el sedimentador gracias a la capacidad del lodo de sedimentar y flocular. Esto gracias a la generación de una matriz gelatinosa, la cual aglutina bacterias, protozoos y otros microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica; estos son flóculos grandes los cuales por peso, facilitan la sedimentación (Figura 2) (Speriling & Lemos Chernicharo, 2005).

El sistema de lodos activados es estrictamente aerobio, el floc microbioal se mantiene en suspensión en la mezcla aireada del tanque, en presencia de oxígeno disuelto. Algunos prerrequisitos del proceso son sin lugar a duda el contacto íntimo del agua residual con una cantidad óptima de floc biológico activo en presencia de un adecuado suministro de oxígeno, durante un período de tiempo conveniente, seguido de una separación eficiente de los organismos y del líquido purificado (Romero Rojas J. , 1999).

El sistema de lodos activados es usado cuando se requiere un efluente de alta calidad y el espacio existente es limitado (Speriling & Lemos Chernicharo, 2005).

**Figura 2.** Flóculos desarrollados en un sistema de lodos activados.



Autor: Speriling & Lemos Chernicharo, 2005

**Microbiología del sistema de lodos activados:** En este tipo de sistemas de tratamiento se encuentran ciertos microorganismos bioindicadores del estado y edad del lodo que sirven para determinar condiciones de operación del reactor. Para ello es de suma importancia la observación microscópica del lodo periódicamente y contrastarla con los resultados de las pruebas físico-químicas y tomar medidas según el caso. Estos organismos suelen llamarse bioindicadores por su fácil identificación y su papel en el sistema.

En los sistemas de lodos activados, los principales organismos en el tanque de aireación son Bacterias, protozoos y metazoos, para su identificación se debe tener presente:

**Bacterias:** Constituyen la población de predominio y de importancia en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Gracias a sus diferentes actividades bioquímicas pueden metabolizar gran parte de los compuestos orgánicos que se presentan en el agua residual. Igualmente su importancia se basa en la capacidad que tienen algunas de flocular. Gracias a la formación de estos flóculos, los lodos sedimentarán mejor y se logra un efluente más claro y con mejor calidad (Vilaseca V. , 2001).

En el proceso de purificación son importantes las bacterias nitrificantes, consideradas como organismo principal en la formación del lodo activo por su gran agilidad para formar el floc biológico, sin ser el único organismo capaz. Por otro lado se encuentran las bacterias filamentosas, cuya presencia es adversa a las características de sedimentabilidad del floc de lodos activados, generando un

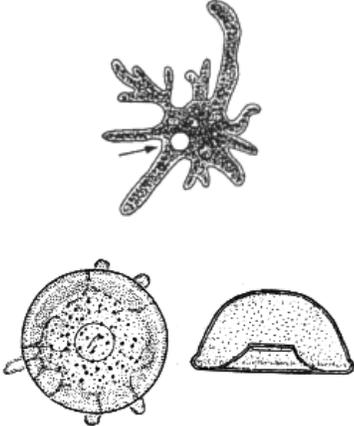
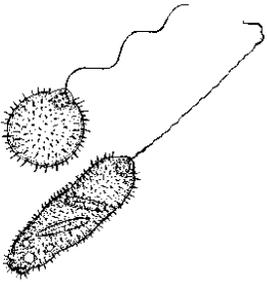
problema común en este tipo de procesos biológicos aerobio donde la sedimentabilidad es pobre, haciendo que el floc formado flote (Romero Rojas J. , 1999).

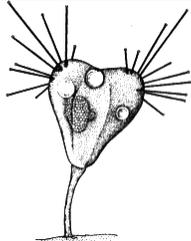
Protozoos y Metazoos: son los principales indicadores de la edad y el estado del lodo, al igual que las posibles condiciones operacionales.

Los Protozoos, son organismos unicelulares que pueden metabolizar alimentos solubles e insolubles. Son microorganismos consumidores de bacterias y materia orgánica particular y son los principales responsables de un efluente claro y de mejor calidad. Actúan eliminando el exceso de bacterias no floculadas, es decir aquellas bacterias libres o no formadoras de flóculos que se encuentran dispersas. A su vez son indicadores de toxicidad ya que son más sensibles a los tóxicos y cambios de oxígeno en el reactor.

En un sistema de lodos activados se pueden encontrar grupos básicos como sarcodinas, flagelados, ciliados, cada uno de los cuales tiene ciertos parámetros de identificación generales, principalmente según su método de locomoción: (Tabla 3) (Vilaseca V. , 2001)

**Tabla 3.** Identificación de grupos básicos de protozoarios.

	<p><b>Sarcodinas:</b> No tienen una forma definida, ya que carecen de pared celular. Protrusiones de protoplasma, a modo de pseudópodos, son usados como mecanismo de locomoción y también para fluir alrededor de partículas de alimento, permitiendo así la ingestión. Se reproducen sexualmente por fisión binaria, responden quimiotácticamente a la proximidad de una partícula alimenticia, sacando pseudópodos hacia ella y rodeándola. Se alimentan de otros protozoarios, algas pequeñas y bacterias. La partícula queda dentro de una vacuola, donde se secretan enzimas digestivas. (Carpenter, 1979)</p>
	<p><b>Flagelados:</b> Son pequeños entre 5 y 20 <math>\mu\text{m}</math>, aproximadamente, de forma oval o alargados, activamente móviles por uno o varios flagelos. Su elevada densidad en los reactores se relaciona con las primeras etapas de la puesta en marcha de la instalación, indicando niveles de DBO soluble altos. La presencia excesiva en un fango estable puede indicar una baja oxigenación o un exceso de carga en el sistema. (Vilaseca V. , 2001)</p>

<p><b>Ciliados:</b> Estos organismos contribuyen directamente a la clarificación del efluente gracias a la floculación y a la depredación. Las bacterias patógenas hacen parte de su grupo de alimentos, reduciendo los niveles de estas en el agua. Los ciliados se pueden clasificar según su relación con el flóculo: (Vilaseca V. , 2001)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ciliados asociados al flóculo: Los pedunculados y los reptantes.</li> <li>- Ciliados no asociados al flóculo: Los nadadores libres.</li> </ul>	
<p>1. Ciliados nadadores libres: tienen formas ovoides, redondeadas, alargadas entre 20 y 400 <math>\mu\text{m}</math> aproximadamente, su mecanismo de locomoción son los cilios. Están presentes bajo condiciones de formación de flóculos e indican un buen proceso de lodos activados.</p>	
<p>2. Ciliados reptantes: Reptan sobre el lodo alimentándose de las bacterias que encuentran a su paso, estos presentan estructuras ciliares llamadas cirros, que al igual que los cilios se desplazan libremente a través del agua, indicando su presencia un lodo de buena calidad.</p>	
<p>3. Ciliados Pedunculados: Hacen parte de los ciliados asociados al flóculo. Tienen un pedúnculo el cual puede ser fijo o contráctil. Generalmente se alimentan de bacterias libres, y son indicadores de un lodo estable.</p>	
<p>4. Suctorias: Cuerpo redondeado con o sin pedúnculo. Están provistos de unos tentáculos que rodean su cuerpo y se adhieren a otros protozoarios, disuelven la membrana y los vacían para poder alimentarse de ellos.</p>	

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

Los ciliados pedunculados y reptantes resultan ser los más frecuentes cuando el sistema está funcionando correctamente, ya que el proceso está diseñado para la formación de flóculos los cuales son usados por estos organismos para su desarrollo (Gómez Gómez, Lebrato Martínez, Bermúdez Sanchez , & Salguero Villadiego, 1999).

Junto a los protozoos se encuentran los metazoos, organismos de tamaño relativamente grande y entre ellos se encuentra en los sistemas de lodos activados la representación de Rotíferos, estos, son animales microscópicos, multicelulares, aerobios, heterótrofos, muy efectivos en su función de limpieza al consumir bacterias, coloides orgánicos y algas. Poseen dos series de cilios rotantes sobre su cabeza, los cuales usan para moverse y capturar el alimento, de allí su nombre (Romero Rojas J. , 1999). Se encuentran en sistemas con una estabilización buena y con oxígeno disuelto sobrante. Contribuyen a la

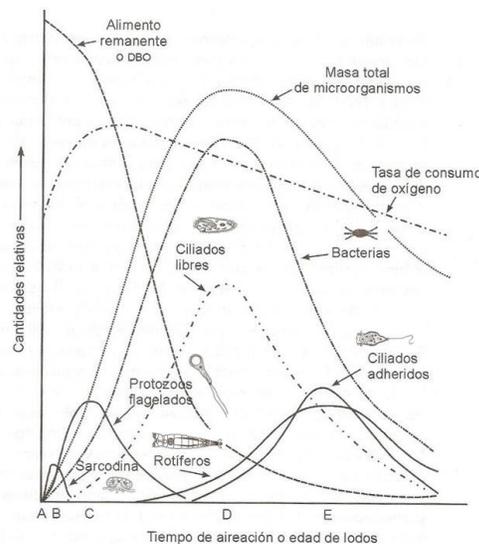
clarificación del efluente (Vilaseca V. , 2001), su presencia indica un proceso de tratamiento biológico aerobio eficiente. (Romero Rojas J. , 1999)

Según la presencia de los organismos antes mencionados se puede deducir la edad del lodo de forma general y por ello se interpreta que un lodo joven se caracteriza por la dominancia de representantes del grupo de los flagelados, junto con algunos ciliados nadadores libres. Un lodo de edad elevada es aquél donde se encuentran nematodos, suctores y rotíferos en exceso. Cuando el lodo es estable es por que presenta una alta densidad de microfauna compuesta principalmente por ciliados sésiles y reptantes, con ausencia casi total de flagelados (Gómez Gómez, Lebrato Martinez, Bermúdez Sanchez , & Salguero Villadiego, 1999).

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

Una herramienta importante en el análisis microbiológico es el diagrama de predominio relativo, donde suponiendo condiciones ideales del sistema como: temperatura de 20°C, pH entre 6,5 y 8,5 unidades, OD mayor a 2 mg/L, nutrientes apropiados, ausencia de sustancias tóxicas y un reactor tipo cochada, se representan las etapas en las cuales los organismos alcanzan su número máximo. En la figura 3, se observa el diagrama de predominio relativo, en su eje horizontal se representa el tiempo de aireación o la edad de lodos y en el eje vertical el número relativo de organismos (Romero Rojas J. , 1999).

**Figura 3.** Diagrama de predominio relativo.



Fuente: Orozco Jaramillo, 2005; Romero Rojas J. , 1999.

En el punto A, el proceso comienza cuando se introducen las aguas residuales frescas al tanque y se inicia la aireación. Los microorganismos existen pero ninguno predomina. En este punto es esencial mantener las condiciones esenciales del sistema ya que se podrían desarrollar organismos indeseables.

En el punto B, los sarcodinas, organismos primitivos, alcanzan su pico. Este organismo sólo existe en gran número cuando el suministro del alimento es alto.

Los protozoos flagelados alcanzan su pico en el punto C, estos son mucho más activos que las sarcodinas y consumen alimento a una tasa alta. Un lodo joven es aquél, que cuenta con un nivel predominante de flagelados, que causa un alto consumo de oxígeno, con el fin de mantener su actividad. Este punto se caracteriza por un efluente con alta DBO y con sólidos suspendidos excesivos gracias a la pobre capacidad de estos organismos en la formación del floc.

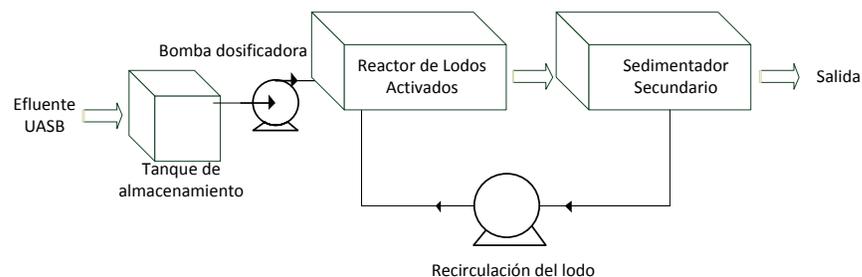
En el punto D, los ciliados libres y las bacterias alcanzan su pico, ambos subsisten con suministro alimenticio menor, que el requerido por los protozoos flagelados, esta es la zona de operación del proceso convencional de lodos activados, logrando un efluente claro y con una DBO baja, a su vez un lodo con buena sedimentabilidad.

Los ciliados adheridos y rotíferos alcanzan su número máximo en el punto E, donde el suministro de alimento es insuficiente para soportar la masa microbial, los organismos usan sus reservas para subsistir y por ello reducen su actividad y conversión de alimento en células. El efluente que se logra, resulta obtener una DBO baja, pero con un alto nivel de sólidos suspendidos a causa de la masa microbial aglutinada de células muertas (Romero Rojas J. , 1999).

### Sistema convencional de lodos activados con recirculación

El proceso biológico convencional de lodos activados está compuesto por un tanque de aireación, sedimentador y recirculación de lodos activados. (Figura 4)

**Figura 4.** Esquema del proceso convencional de lodos activados.



Fuente: Autor

Para el diseño de este proceso según Romero Rojas (1999), se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

a. Tiempo de aireación: Es función de la concentración de DBO del agua residual afluente y del volumen del tanque de aireación.

b. Carga orgánica (CO): Cantidad de materia orgánica, se expresa como el producto de la concentración de la DBO por el caudal del afluente a tratar.

c. Carga orgánica volumétrica (COV): Expresado en gramos de DBO aplicado por metro cúbico del volumen del licor mixto en el tanque de aireación. La disminución del tiempo de aireación o el incremento del caudal del afluente, causa un aumento del COV.

d. Relación alimento / microorganismos (A/M): Es una forma de expresar la carga de DBO por unidad de masa microbiana en el sistema. Si esta relación es menor que 0,05 implica que en el sistema hay un exceso de lodos, los cuales deben ser purgados, pero si A/M es mayor que 0,15 significa que se debe aumentar la concentración de SST en el tanque de aireación, para ello será necesario detener la purga de lodos, haciendo recirculación completa del lodo (Comisión nacional del medio ambiente, 1997).

e. Tiempo de retención celular: Se refiere a la edad del lodo, se interpreta como una medida del tiempo promedio de residencia de los organismos en el sistema.

### **Tratamiento acuático (Plantas acuáticas)**

Los sistemas de tratamiento acuático han sido desarrollados fundamentalmente en países con clima templado y los criterios empleados para su diseño son obtenidos experimentalmente, varía según el lugar donde se aplique este tipo de tratamiento, ya que las condiciones climáticas son un factor influyente (Rodríguez Pérez, 2008). Estos sistemas son aquellos en los cuales aplican las aguas residuales sobre terrenos húmedos naturales o artificiales con el propósito de remover sus contaminantes con la ayuda de plantas acuáticas las cuales se encargan de remover principalmente nutrientes como el nitrógeno y el fósforo presentes en el agua residual (Romero Rojas J. , 1999).

El tratamiento con plantas acuáticas cubre un amplio rango de sistemas dentro de los que incluyen una variedad de humedales artificiales, sistemas de plantas acuáticas flotantes y la combinación de éstos (Crites & Tchobanoglous, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones., 2000). Estos sistemas son especialmente eficaces en la eliminación de nutrientes como el N y P siendo absorbidos en grandes cantidades por las plantas (Martin M, 1989).

Para los sistemas de plantas acuáticas basados en macrófitas de hojas flotantes, se utilizan comúnmente *Eichhornia crassipes* conocida como el Jacinto o buchón

de agua. Este tipo de macrófitas tiene sus órganos reproductores flotantes o aéreos (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade , 2010), es una planta acuática perenne, vascular, flotante de agua dulce, clima cálido y frío. Su habilidad de crecimiento y adaptación le permite sobrevivir y extenderse en muchos sitios. Gracias a su extenso sistema radicular tiene excelente poder de filtración y capacidad para absorber impurezas y contaminantes como el níquel, plomo, cadmio, mercurio, cromo, plata entre otros (Romero Rojas J. , 1999). La planta crece muy rápido, especialmente en aguas residuales.

El Jacinto posee propiedades importantes tales como:

- Funciona como filtro biológico removiendo sustancias tanto biodegradables como no biodegradables, nutrientes, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos. (Rodríguez Pérez, Diaz Marreno, Guerra Diaz, & Hernandez de Armas)
- Transportan el oxígeno desde las hojas y tallos hasta las raíces, creándose cerca de la rizosfera una zona adecuada para la oxidación de la materia orgánica por parte de las bacterias aerobias presentes. (González Díaz, Hernández Marrero, Rodríguez Pastor, & Prats Rico, 2000) Característica que varía y depende de la densidad de las plantas. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade , 2010)

En la tabla 4 se encuentra las características generales del buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), que se deberán tener en cuenta para garantizar su eficiencia al momento de implementarlas en un sistema de tratamiento.

**Tabla 4.** Descripción del buchón de agua, (*Eichhornia crassipes*).

**Figura 5.** Buchón de agua, (*Eichhornia crassipes*)



Fuente: <http://fichas.infojardin.com/acuaticas/eichhornia-crassipes-jacinto-de-agua-camalote-camalotes.htm>

**Nombre científico:** *Eichhornia crassipes*

**Nombre común o vulgar:** Jacinto de agua, Camalote, Camalotes, Lampazo, Violeta de agua, Buchón, Taruya.

**Familia:** Pontederiaceae (Pontederiáceas).

**Luz:** Requiere iluminación intensa, si es artificial, deberá ser proporcionada por una rampa luminosa completa.

**Temperaturas:** Se cultiva a una temperatura entre 20 y 30°C. No resiste los inviernos fríos (hay que mantenerla entre 15 y 18°C en contenedores con una profundidad de al menos 20 cm, y una capa delgada de turba en el fondo). Puede rebrotar en primavera si se hiela.

**Características generales:**

- Especie flotante de raíces sumergidas.

- Carece de tallo aparente, provisto de un rizoma, muy particular, emergente del que se abre un rosetón de hojas que tienen una superficie esponjosa notablemente inflada en forma de globo el cual forma una vejiga llena de aire, mediante la que el vegetal puede mantenerse sobre la superficie acuática.

- Hojas sumergidas lineares y las emergidas, entre obovadas y redondeadas, provistas de pequeñas hinchazones que facilitan la flotación.

- Las raíces son muy características, negras con las extremidades bancas cuando son jóvenes, negro violáceas cuando son adultas.

**Multiplificación:** Mediante división de los rizomas. Durante el verano se reproduce fácilmente por medio de estolones que produce la planta madre.

Fuente: Adaptado de Infojardín.

### **Tratamiento con buchón de agua (*Eichhornia crassipes*)**

Este tipo de tratamiento permite remover metales pesados, nutrientes, pesticidas y otros contaminantes orgánicos.

Para el tratamiento de aguas residuales con buchón de agua se debe tener en cuenta aspectos como el tipo de sistema, localización, clima, los mecanismos de remoción, transformación de los constituyentes y evidentemente las características de adaptación de la especie, así como la características físicas del sistema.

En cuanto al crecimiento y cosecha del buchón de agua la temperatura resulta ser un factor determinante en su tasa de crecimiento, tanto la temperatura del ambiente como la del agua a tratar, estas son claves para asegurar la vitalidad de la planta. El crecimiento del Jacinto se puede describir en:

- 1- Porcentaje de crecimiento de la superficie de la laguna en un periodo de tiempo.
- 2- Densidad de las plantas en unidades de masa húmeda de plantas por unidad de área superficial.

(Crites & Tchobanoglous, Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados., 2000)

Se debe realizar un manejo de la vegetación, con el fin que la renovación de la materia vegetal aumente la remoción de nutrientes, para ello se debe realizar periódicamente la cosecha de las plantas antes que se produzca su descomposición en el agua afectando la calidad del efluente (Martin M, 1989). La disposición del buchón cosechado, constituye una de las limitaciones del proceso. La planta retirada del sistema puede someterse a digestión anaerobia para producir metano, incineración, a compostaje para disposición posterior sobre el suelo, secado al aire o disposición en un relleno sanitario. (Crites & Tchobanoglous, Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados., 2000)

Para lograr niveles de remoción significativos en el proceso, es importante conocer los mecanismos de remoción y transformación de los constituyentes presentes en el agua residual, gracias a la implementación del buchón de agua, tal como se describen en la tabla 5.

**Tabla 5.** Mecanismos operativos para la remoción de constituyentes de aguas residuales gracias a la utilización de Buchón de agua.

REMOCIÓN DE	DESCRIPCIÓN
<b>DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO</b>	Una parte de la DBO se remueve junto a con los SST y SS que no sedimentan removiéndose por medio de filtración. La DBO soluble se retira por la adsorción a medida que el flujo del agua atraviesa las raíces del buchón de agua. Esta también se elimina gracias a la conversión bacteriana en la columna de agua. Con el tiempo los organismos que están adheridos a las raíces convertirán una parte de la DBO asociada a la fracción orgánica de los SST acumulados en la zona radicular y la DBO adsorbida, usando el oxígeno que la planta transporta hacia las raíces.
<b>SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES</b>	Una parte de los SST se remueve por sedimentación en la columna de agua, otra parte de los SS que no se sedimentan se retiran por filtración a medida que el agua fluye a través de las raíces. Estas a su vez envejecen y caen al fondo del canal, llevándose consigo los SST acumulados y realizando una filtración adicional en el sistema.
<b>NITRÓGENO</b>	El principal mecanismo que participa en la remoción del nitrógeno es la nitrificación – desnitrificación; en las plantas la zona radicular es la ubicación de ocurrencia. Una parte del nitrógeno orgánico se retira por sedimentación. Las plantas en crecimiento dan cuenta de parte del nitrógeno que toman para su crecimiento, el cual se retira cuando las plantas se cosechan, aunque no es muy efectivo. En donde se suministra aireación el nitrógeno se pierde por volatilización.
<b>FÓSFORO</b>	Los medios principales para la remoción de fósforo en las aguas residuales son la adsorción de sólidos de agua residual y material vegetal, la adsorción de materia orgánica en la capa de lodo y la asimilación vegetal.

Fuente: Crites & Tchobanoglous, Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados., 2000.

Como otro factor importante a considerar son las características física del sistema, teniendo como prioridad la profundidad, su control es esencial con el fin de garantizar el contacto de las raíces con el agua a tratar, este contacto es de suma importancia ya que en las raíces de las plantas se encuentra una masa activa de microorganismos que descomponen y ayudan en la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual, a su vez se debe asegurar que el tiempo de contacto de las plantas con el agua residual sea el suficiente para cumplir eficientemente el objetivo del tratamiento y lograr niveles remoción significativos (Rodríguez Pérez, Díaz Marreno, Guerra Díaz, & Hernandez de Armas).

En una laguna con buchón de agua que trate un efluente secundario permite obtener concentraciones de DBO <10 mg/L; SS <10 mg/L; NTK <5 mg/L y P < 5 mg/L, (Romero Rojas J. , 1999).

### **3.4 MARCO LEGAL**

El propósito de los tratamientos de aguas residuales doméstica es mitigar los impactos que estas generan al ser arrojadas a los diferentes cuerpos de aguas, es por ello que se ha hecho necesario establecer límites para evitar que los ecosistemas mueran y las condiciones sanitarias de las fuentes hídricas afecten a la comunidad. La legislación colombiana lleva a lo largo de varios años desarrollando diferentes normas con el propósito de asegurar un ambiente sano y dar cumplimiento al artículo 79 de la Constitución Política de Colombia, de 1991; desarrollando normas para aire, suelo, agua, gestión ambiental entre otras ramas importantes para el cuidado del ambiente y la salud pública.

Para el caso de vertimiento en Colombia, se cuenta con el Decreto 1594 de 1984 el cual no se está vigente actualmente, en este decreto se habla del uso del agua y residuos sólidos. Desde Octubre de 2010 se encuentra vigente un proyecto de norma de valores límite máximos permisibles de parámetros en vertimientos puntuales a sistemas de alcantarillado público y a cuerpos de aguas continentales superficiales de generadores que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicio; propuesta por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), sin embargo este proyecto aún no cuenta con una resolución la cual obligue su cumplimiento y por ende se exigen actualmente los requisitos presentados en el decreto 1594 de 1984.

La evaluación y el seguimiento de parámetros es fundamental, permite conocer el grado de cumplimiento de la normatividad vigente y de esta forma ir buscando las mejoras respectivas de los sistemas, así evitar sanciones y el pago de tasas retributivas contempladas en el Decreto 3100 de 2003.

El decreto 1594 de 1984, en el capítulo VI se dedica a tratar exclusivamente el tema de vertimientos de residuos líquidos. Los parámetros exigidos a la UPB como generadora de vertimientos a una fuente superficial de agua por este decreto se encuentran en la tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros exigidos por 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%
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) *	Rem > 30%	Rem > 80%

Fuente: Adaptado del artículo 72, del Decreto 1594 de 1984, "Uso del agua y Residuos Sólidos"\*Los porcentajes de remoción son referentes a las cargas.

En contraste con la anterior norma, se encuentra el proyecto de vertimiento propuesto por el MAVDT, donde su análisis e interpretación se desarrolla con el propósito de conocer en qué estado se encontraría la UPB en el momento en que salga la resolución para que este proyecto de norma de valores permisibles y entre a funcionar, considerando que este maneja valores y parámetros que lo hacen más exigente que el decreto 1594 de 1984.

Este proyecto cuenta con la particularidad de expresar los valores máximos permisibles en unidades de concentración y a su vez exige mayor cantidad de parámetros que el decreto 1594 de 1984 el cual habla en porcentajes de remoción.

Los parámetros exigidos a la UPB como generadora de vertimientos a una fuente superficial por este proyecto se encuentran en la tabla 7.

**Tabla 7.** Parámetros exigidos en el Proyecto Resolución de Octubre de 2010

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Instalación existente</b>	<b>Instalación nueva</b>
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
Fósforo total (P)	mg/L	5.0	2.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	200.0	50.0
Sólidos suspendidos Totales (SST)	mg/L	200.0	50.0
Nitrógeno Total (N)	mg/L	20.0	10.0

Fuente: Adaptación capítulo IV, Proyecto de resolución del MAVDT por la cual se establecen las normas y los valores límite máximos permisibles de parámetros en vertimientos puntuales a sistemas de alcantarillado público y a cuerpos de aguas continentales superficiales de generadores que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicio, MAVDT, 2010.

#### 4. METODOLOGÍA

Para evaluar la posibilidad de cambiar una fracción del tratamiento terciario a un reactor de lodos activados en condiciones de laboratorio, se llevó a cabo en cuatro fases. En todas las fases las pruebas de laboratorio se hicieron bajo la auditoría del Laboratorio de Análisis Químico de Aguas Residuales de la UPB siguiendo el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, & WEF, 2005).

##### **Fase 1: Establecimiento de condiciones para la operación del reactor de lodos activados.**

El reactor de lodos activados a escala de laboratorio se diseñó y se construyó simulando los canales existentes del sistema terciario, en su elaboración se tuvo en cuenta la capacidad de la bomba disponible y el reactor prototipo donde se adelantaron los estudios previos para la implementación del tratamiento terciario (Gamarra, 2003), el montaje fue elaborado previo al inicio del estudio. En la figura 6 se muestra el montaje empleado para el estudio.

**Figura 6.** Montaje del sistema de lodos activados escala laboratorio.



Fuente: Autor

Las características físicas del sistema de lodos activados en términos de volumen de almacenamiento son: 1) Tanque de almacenamiento del agua residual: 208 L.

2) Volumen útil del tanque de aireación: 130.35 L y 3) Volumen útil del sedimentador: 99.856 L.

El tanque de almacenamiento se empleó para distribuir el caudal de agua residual proveniente de los Reactores Anaerobios a Flujo Pistón-RAP, este afluente se bombeó al tanque de aireación del sistema de lodos activados, en forma continua empleando una bomba dosificadora marca HANNA INSTRUMENTS, referencia BL20, con una capacidad de 18.3LPH, (figura 7).

**Figura 7.** Bombas Dosificadoras.



Fuente: Autor

Para el arranque del sistema de lodos activados de la primera fase se contó con las siguientes consideraciones de operación:

**Inóculo:** Se empleó un inóculo aclimatado, proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales del Instituto Colombiano del Petróleo - ICP, en donde se emplea una tecnología similar a la que se pretende estudiar. Este lodo se caracterizó según los parámetros mostrados en la tabla 8.

**Sustrato:** Caracterización del efluente proveniente del tratamiento anaerobio de la PTAR-UPB siguiendo el método y la frecuencia mostrada en la tabla 9.

**Tabla 8.** Parámetros de caracterización del inóculo.

Parámetro	Método	Código*
Prueba de Lodos	Sólidos totales	2710 B
	Sólidos totales volátiles	
	Índice volumétrico de lodos	2710 D

\* Código establecido por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21<sup>th</sup> Edition.

**Tabla 9.** Parámetros de caracterización de sustrato

Parámetro	Método	Código*	Frecuencia
Alcalinidad	Método de Titulación	2320B	Diaria
DBO	DBO <sub>5</sub>	5210 B	Tres veces por semana
DQO	Flujo Cerrado	5220	Tres veces por semana
Fósforo	Digestión ácida, método del ácido ascórbico.	4500-P	Tres veces por semana
Nitrógeno (NTK)	Método Kjeldahl	4500-N	Tres veces por semana
Oxígeno Disuelto	Oxímetro		Diaria
pH	pH metro		Diaria
Sólidos	Sólidos totales	2540 B	Tres veces semana
	Sólidos totales volátiles	2540 E	
	Sólidos sedimentables	2540 F	
Temperatura	Multiparámetro		Diaria

\* Código establecido por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21<sup>th</sup> Edition.

**Toma de muestras afluente y efluente:** La toma de las muestra de efluente para el seguimiento se realizó teniendo en cuenta la frecuencia de la tabla 9 y en un periodo de tiempo posterior a la toma del afluente igual al tiempo retención hidráulico. La prueba de lodos se realizó tres veces por semana (figura 8).

**Figura 8.** Prueba de sedimentabilidad del lodo, proveniente del tanque de aireación del sistema de lodos activados.



Fuente: Autor

El reactor inició operación con tiempos de retención hidráulicos de 24 horas, según la respuesta y dependiendo de las necesidades que el sistema presentara en cuanto a carga orgánica, aireación y recirculación del lodo, reflejados en los porcentajes de remoción de DQO; se realizaron las modificaciones respectivas.

Paralelo al seguimiento físico-químico, se realizaron estudios microbiológicos del licor mixto, con el fin de conocer las características de la biota microbiana y precisar la edad del lodo y su estado de madurez. El análisis se realizó durante un mes, tomando muestras puntuales al inicio de semana (lunes) y al final de semana laboral (viernes).

Los estudios microbiológicos se realizaron empleando el microscopio compuesto binocular Olympus CH6 1000X. Se procesaron muestras de 250 ml del tanque de aireación. Los microorganismos predominantes se identificaron in vivo y se clasificaron la mayoría de los especímenes hasta género.

**Análisis de resultados:** Los resultados obtenidos permitieron ser contrastados con el diseño teórico con el fin de realizar ajustes correspondientes para determinar las condiciones de operación necesarias para un adecuado funcionamiento del sistema de lodos activados como: 1) tiempo de retención hidráulico y 2) tiempo de retención celular.

Para la determinación de estos parámetros de operación se realizó un listado de ecuaciones para aplicar en el diseño de procesos de lodos activados. (Anexo 2)

## **Fase 2: Evaluación de la inclusión de buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) para la remoción de nutrientes en el sedimentador del sistema de lodos activados.**

Una vez estabilizado el reactor de lodos activados, se inició la etapa de evaluación en la remoción de nutrientes en el sedimentador secundario mediante el uso del buchón de agua, *Eichhornia crassipes*.

Al sistema de lodos activados-sedimentador, se le adicionó una población de plantas acuáticas, buchón de agua, procedentes del sistema terciario de la PTAR-UPB, seleccionando según los siguientes criterios: 1) Tamaño general mediano. 2) Raíz, blanca y joven, y 3) Color de hojas verdes y de tamaño mediano. (Figura 9)

**Figura 9.** Selección de plantas para su traslado al sedimentador del sistema de lodos activados.



Fuente: Autor

La evaluación del sistema de lodos activados-sedimentador se realizó igual a la fase 1. Como parámetro de control y evitar sesgos en la interpretación de los resultados, la masa de plantas acuáticas se mantuvo en un peso constante, siendo necesario cosechar y remover las hojas o plántulas afectadas. Se registraron los resultados como se muestra en la tabla 10, durante dos semanas de operación.

**Tabla 10.** Formato de registro para datos de operación fase 2.

DÍA	CRECIMIENTO DE BIOMASA	% DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO	% DE REMOCIÓN DE FÓSFORO

Fuente: Autor

### **Fase 3: Determinación de los parámetros de diseño para el dimensionamiento del sistema de lodos activados.**

La determinación de los parámetros de diseño se llevó cabo mediante la metodología recomendada por Metcalf y Eddy (1996), donde se busca la determinación de coeficientes cinéticos con la operación del reactor a escala laboratorio en diferentes tiempos de retención celular, permitiendo establecer condiciones de estado permanente y cuantificar los parámetros requeridos para el dimensionamiento del sistema de lodos activados y de esta forma lograr

determinar valores promedios de caudal, sustrato y biomasa (Romero Rojas J. , 1999).

La aplicación de los principios cinéticos supone el conocimiento de la constante de saturación ( $K_s$ ), tasa máxima de remoción de sustrato por unidad de masa de microorganismos ( $k$ ), el coeficiente de producción de crecimiento ( $Y$ ) y el crecimiento de respiración endógeno ( $K_d$ ). Dichos valores se obtienen en el laboratorio, mediante la operación del reactor a escala laboratorio, en diferentes condiciones de tratamiento, que permiten obtener los parámetros requeridos para cuantificar los valores de las constantes biológicas.

Utilizando los resultados de la fase 1 y 2, se lograron determinar los valores medios de dichas constantes mediante el uso de ecuaciones y graficas presentadas en la tabla 11, las cuales, permiten deducir gráficamente dichos coeficientes necesarios para el dimensionamiento del sistema (Metcalf & Eddy, Inc, 1996).

**Tabla 11.** Ecuaciones utilizadas para la determinación de constantes cinéticas.

No.	Ecuación	Gráfica	Deducir valores de	
			Según pendiente	Según ordenada en el origen
Ec. 1	$\frac{X\theta}{S_0 - S} = \frac{K_s}{kS} + \frac{1}{k}$	$\frac{X\theta}{S_0 - S}$ contra $\frac{1}{S}$	$\frac{K_s}{k}$	$\frac{1}{k}$
Ec. 2	$\frac{1}{\theta_c} = Y \frac{S_0 - S}{X\theta} - K_d$	$\frac{1}{\theta_c}$ contra $\frac{S_0 - S}{X\theta}$	Y	Kd
Ec. 3	$\mu_m = kY$		* $\mu_m$	

\*Se obtiene como resultado del desarrollo de la ecuación. Fuente: Adaptado Romero Rojas J. , 1999; Metcalf & Eddy, Inc, 1996.

#### **Fase 4: Dimensionamiento de un sistema de lodos activados tomando como referencia los canales empleados en el sistema terciario PTAR-UPB**

Para el dimensionamiento del sistema de lodos activado-sedimentador, las fases anteriores han sido de suma importancia, con el fin de conocer la viabilidad de implementar este tipo de procesos en la infraestructura presente en el sistema terciario de la PTAR-UPB. Fue primordial el conocimiento de las medidas actuales

del sistema y el espacio con en el que se cuenta para la adaptación adecuada del tratamiento de lodos activados-sedimentador.

Teniendo claro la configuración del sistema terciario y junto con los resultados obtenidos en las anteriores fases, se procedió a calcular las dimensiones que permitan la migración de los canales a un sistema de lodos activados en el espacio del sistema terciario de la PTAR-UPB, cumpliendo con los requerimientos técnicos, normativos y en especial buscando que contribuya a un tratamiento del agua residual efectivo.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

**Fase 1: Establecimiento de condiciones para la operación del reactor de lodos activados (L.A).** En el establecimiento de las condiciones de operación del reactor fue fundamental establecer hasta que tiempo de retención hidráulico se podría operar el sistema. Los cambios de operación del sistema se realizaron en función de los porcentajes de remoción, cada que superara el 50%, llegando a tiempos retención hidráulico de 6 horas; los tiempos hidráulicos, el caudal de operación y el caudal de recirculación se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12.** Operación hidráulica del sistema de lodos activados

Período (Días)	AF	T.R.H (Horas)	Qo (m3/día)	Qr (m3/día)
1 – 3	EF. RAP	24	<b>0.130</b>	<b>0.039</b>
3 – 5	EF. RAP	20	<b>0.156</b>	<b>0.047</b>
5 – 9	EF. RAP	15	<b>0.209</b>	<b>0.209</b>
12 – 31	EF. RAP	8	<b>0.391</b>	<b>0.117</b>
31 – 94	EF. RAP	6	<b>0.521</b>	<b>0.261</b>

En la tabla 12 se puede visualizar que en la operación a tiempos de retención bajos, presenta periodos de evaluación más prolongados, esto se presentó principalmente por los problemas de operación hidráulicos del sistema, ocasionados por la escala evaluada que dificultó la recirculación de lodo inoculado y adicionalmente por la variabilidad de la carga afluente como se mostrará más adelante.

**Caracterización del inóculo:** El lodo proveniente del ICP se sometió a una aireación constante y una adicción de alimento por un periodo de 2 a 3 días, antes de agregarlo al tanque de aireación, removiendo el agua en exceso, para adicionar un lodo lo suficientemente concentrado (Figura 10).

**Figura 10.** Aclimatación del lodo.



Fuente: Autor

La inoculación en el sistema fue necesaria realizarla en dos oportunidades durante la fase 1 por los cortes de la electricidad del campus que originaron la muerte de microorganismos en el tanque de aireación; al adicionar el lodo al tanque de aireación, éste contaba con una caracterización específica presentada en la tabla 13; en ambas ocasiones contó con una concentración entre 3930 y 4030 mg/L, asegurando similares condiciones de arranque.

**Tabla 13.** Caracterización del lodo traído del Instituto Colombiano del Petróleo – ICP

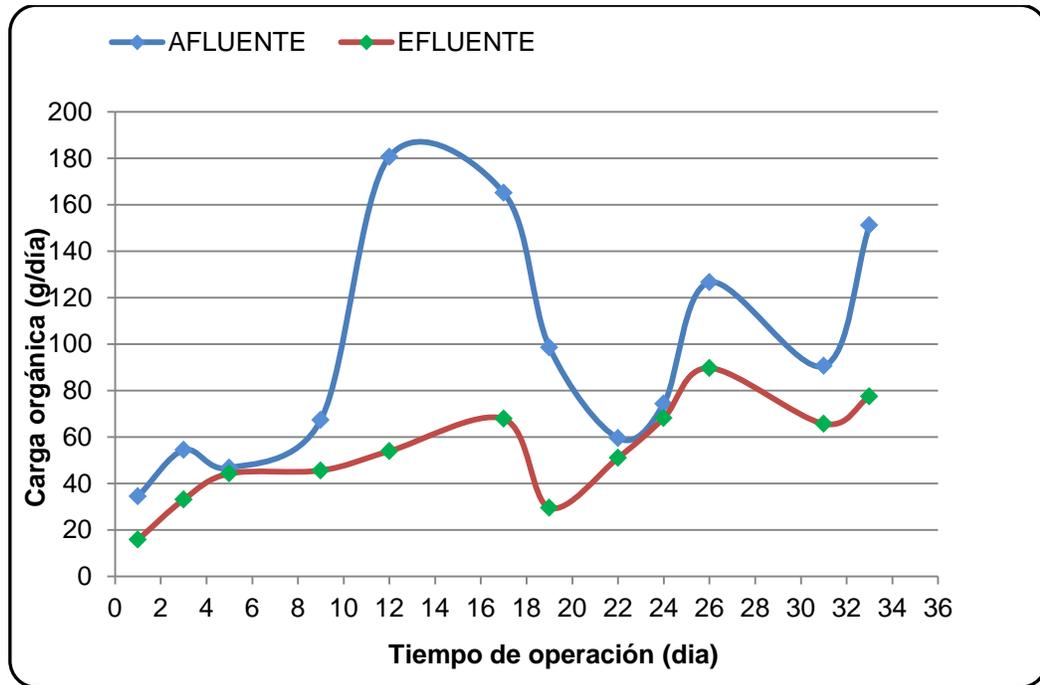
PARÁMETRO	Día de operación: 0		Día de operación: 47	
	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Volumen lodo [ ]	30	L	79	L
ST	17082,5	mg/L	6650	mg/L
STV	9505	mg/L	3505	mg/L
% de STV en ST	56	%	53	%
Densidad	0,98908	g/mL	0,99171	g/mL
Sólidos sedimentables	550	mg/L	400	mg/L
IVL	32,2	mL/g	60,2	mL/g
<b>Condiciones en el ARRANQUE</b>				
Volumen T.A.	130,35	L	130,35	L
Masa	512475	mg	525350	mg
[ ] en el Arranque	<b>3931,5</b>	mg/L	<b>4030,3</b>	mg/L

Fuente: Autor

Aunque se realizaron dos inoculaciones la segunda se comenzó con un tiempo de retención hidráulica de 6 horas, teniendo en cuenta la respuesta presentada en la primera inoculación, se encontró que el sistema respondió con buenas eficiencias de remoción en términos de DQO para las cargas mayores, mostrando que se puede trabajar el sistema con bajos tiempos de retención hidráulico, si se cuenta de entrada con inóculo aclimatado, como se explicará en la caracterización del sustrato.

**Caracterización del sustrato:** El sustrato al inicio de la operación del sistema, provenía del RAP de la PTAR–UPB, su comportamiento se representa en la figura 11, En general se observa las cargas del afluente, efluente teniendo en cuenta los resultados presentados en la tabla 14.

**Figura 11.** Comportamiento del sistema de lodos activados alimentado con el efluente del RAP de la PTAR-UPB.



Fuente: Autor

**Tabla 14.** Valores de DQO en el sistema de lodos activados alimentado con el efluente del RAP de la PTAR-UPB.

Periodo (días)	DQO (mg/L)		Carga (g/día)		% REM
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
1	263.99	120.96	34.41	15.77	54.18%
3	347.84	211.52	54.41	33.09	39.19%
5	224.16	212.32	46.75	44.28	5.28%
9	323.20	218.72	67.41	45.62	32.33%
12	462.08	137.92	<b>180.70</b>	<b>53.93</b>	<b>70.15%</b>
17	422.40	173.44	<b>165.18</b>	<b>67.82</b>	<b>58.94%</b>
19	252.16	75.52	<b>98.61</b>	<b>29.53</b>	<b>70.05%</b>
22	152.32	130.56	59.56	51.06	14.29%
24	190.08	174.44	74.33	68.21	8.23%
26	323.84	229.44	126.64	89.72	29.15%
31	173.76	126.08	90.60	65.74	27.44%
33	289.92	148.48	<b>151.16</b>	<b>77.42</b>	<b>48.79%</b>

Fuente: Autor

El afluente estudiado contó con carga máxima de 180.696 g/día, después del tratamiento la carga se reduce a 53.93 g/día, esto representa una remoción de 70.15%, (tiempo de retención hidráulico de operación de 8 horas). Paradójicamente el sistema al estar expuesto a una carga mayor, obtuvo mejores resultados en porcentajes de remoción, situación que se repitió en todos los casos donde se trató mayor carga orgánica. La explicación a éste comportamiento desde el punto de vista de la cinética de crecimiento de los microorganismos evidencian exceso de inóculo, donde los microorganismos se inactivan en bajas cargas de sustrato (se debe tener en cuenta que en un reactor completamente mezclado el sustrato presente en el licor mixto corresponde al sustrato tratado), por lo que se denota una ligera tendencia constante en la carga de salida.

Esta fase del estudio se realizó en época de baja producción de caudal del campus, para simular buen comportamiento del sistema anaerobio; con el fin de tener un efluente tratado con bajas concentraciones de DQO, se puede inferir que el sistema de lodos activados como tratamiento del efluente de un reactor anaerobio funcionando en óptimas condiciones, no es una combinación adecuada como tratamiento por las bajas eficiencias obtenidas en el segundo sistema.

Al observar el buen desempeño del sistema en cargas altas con remociones superiores al 50%; se continuó trabajando el sistema con más carga orgánica, obtenida al disminuir el tiempo de retención hidráulico a 6 horas y cambiando el efluente de los reactores anaerobios por el afluente de la PTAR, (posterior al sistema preliminar) mejorando las condiciones de suministro de aire, recirculación del lodo y un nuevo inóculo (la inoculación se hizo obligatoria por problemas del fluido eléctrico).

Los valores de DQO obtenidos al cambiar el afluente del sistema de lodos activados se encuentran en la tabla 15, la nueva carga trabajada en promedio fue de 410.95 g de materia orgánica por día.

**Tabla 15.** Valores de DQO en el sistema de lodos activados alimentado con el afluente de la PTAR-UPB.

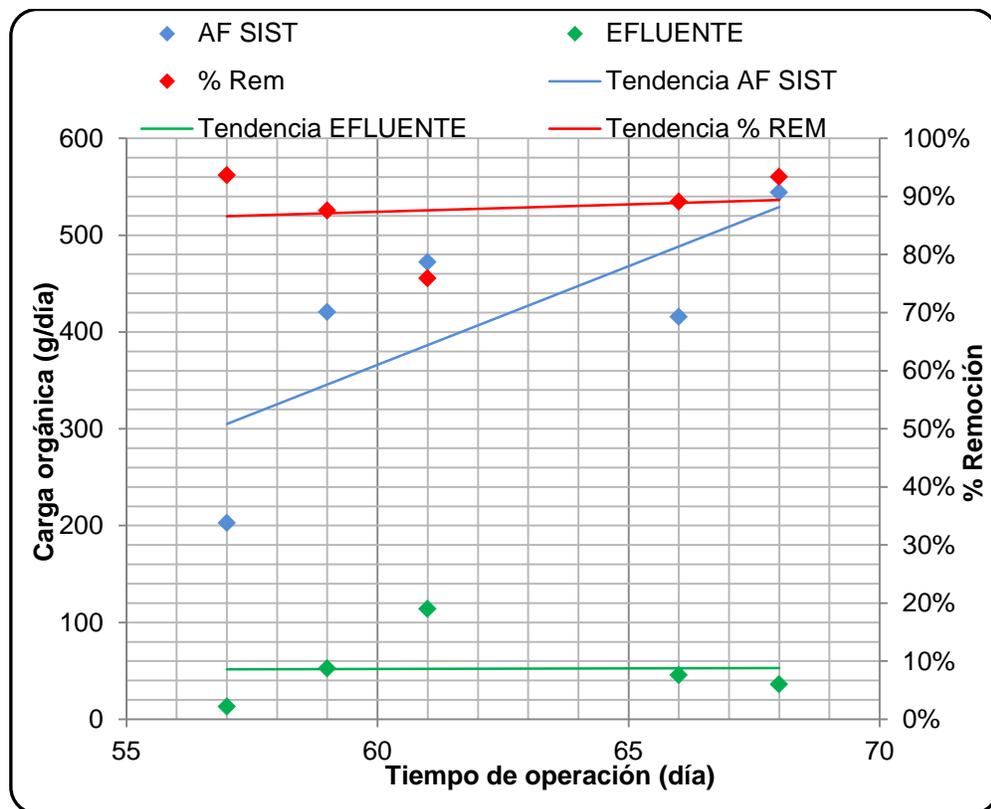
Día	DQO (mg/L)		Carga (gr/día)		% Rem
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
57	388.8	24.64	202.72	12.85	93.66%
59	806.4	100.48	420.46	52.39	87.54%
61	905.6	218.19	472.18	113.76	75.91%
66	796.8	87.04	415.45	45.38	89.08%
68	1043.2	69.105	<b>543.92</b>	36.03	93.38%

Fuente: Autor

Se comprueba que este tipo de aguas con alta carga orgánica, el sistema de lodos activados resulta ser más eficiente como lo menciona Gerardo, 1999; lo cual se presenta por la mejor relación alimento microorganismos presentes en el tanque de aireación, la mayor cantidad de sustrato genera mayor energía metabólica facilitando el crecimiento de los mismos y se ve reflejado en la degradación de la materia orgánica.

Con las nuevas cargas de operación se lograron porcentajes de remoción cercanos al 94% y una carga de salida que oscila alrededor del 52.08 g/día en promedio como se observa la tendencia mostrada en la figura 12, a pesar del incremento que se presentó en la carga afluente, mostrando las bondades del sistema tratando el efluente total de la planta, a pesar del tipo de sustrato empleado.

**Figura 12.** Comportamiento del sistema de lodos activados, alimentado con el afluente de la PTAR-UPB.



Fuente: Autor

De la caracterización del sustrato y del comportamiento del reactor al aumentar la carga, se ratifica que el sistema de lodos activados no necesita un periodo de arranque cuando se realiza una inoculación con sustrato aclimatado, al contrario arrancar el sistema con baja concentración de alimento subalimenta el mismo, ocasionando agotamiento de los microorganismos por falta de alimento y el proceso no funciona eficientemente.

Los resultados de éste estudio sugieren para el arranque de los sistemas adicionar lodo proveniente de una PTAR con características similares, e iniciar el sistema a su máxima capacidad de diseño. El omitir esta etapa de adaptación es posible debido a la estabilidad de la biomasa en el inóculo, siempre y cuando la concentración del lodo este dentro de 2500 y 4000 mg/L, recomendado para un sistema de lodos activados mezcla completa como lo sugiere Romero Rojas J., 1999.

### **Seguimiento físico-químico:**

A continuación se enuncia el resultado de los parámetros más relevantes en este periodo de estudio.

**Alcalinidad:** El sistema se alimentó con un afluente con una alcalinidad promedio de 577.64 mg/L  $\text{CaCO}_3$  (oscilando entre 184 y 933 mg/L). El rango se encuentra dentro de lo típico, según Romero Rojas J. , 1999, el cual reporta que oscila por el orden de 510mg/l.

Luego del tratamiento con lodos activados, la alcalinidad promedio del efluente fue igual de 246.90 mg/L, (valor mínimo: 42 mg/L, máximo: 385 mg/L) los valores superiores a 300 mg/L, corresponden a las fallas operacionales de recirculación del lodo, la acumulación del floc biológico en el tanque sedimentador modifica las condiciones de oxigenación del sistema, permitiendo la descomposición del lodo anaeróbicamente, cambiando la composición del residuo.

Al comparar los valores de alcalinidad en el afluente y efluente con respecto a la remoción de DQO (tabla 16), se comprobó que en un sistema de lodos activados, estos dos parámetros no tienen una relación directa, debido a que la alcalinidad no influye en las remociones que el sistema logre.

La alcalinidad es un parámetro de poca importancia, en el momento de establecer condiciones de operación para un sistema de lodos activados; resultando ser sólo una prueba control para las condiciones del tanque de aireación, más no un criterio en el diseño.

**Tabla 16.** Valores de alcalinidad con la remoción de DQO.

Día	ALCALINIDAD (mg/L)		% REM DQO
	Afluente	Efluente	
19	638	42	70.05%
22	670	232	14.29%
24	466	123	8.23%
26	754	279	29.15%
31	585	222	27.44%
33	653	357	48.79%
38	526	377	81.25%
40	422	316	50.00%
41	446	123	7.41%
57	381	76	93.66%
59	845	205	87.54%
61	569	134	75.91%
66	392	292	89.08%
68	746	347	93.38%

Fuente: Autor

pH: El pH de entrada en la operación del sistema se mantuvo entre 6.70 y 9.0 unidades, dentro del rango adecuado para este tipo de sistemas; evitando un ambiente desfavorable, que permitiera el crecimiento de organismos indeseados, como los hongos filamentosos. En el efluente se mantuvo desde 6.0 hasta 7.85 unidades, dando cumplimiento a ambas normatividades anteriormente mencionadas. Los resultados de este parámetro a través del tiempo se encuentran en el anexo 4.

Oxígeno Disuelto-OD: El oxígeno disuelto en el tanque de aireación tomado luego de 30 segundos de tomada la muestra llegó a valores de 3.80 mg/L, manteniendo una concentración de oxígeno disuelto superior a los 2 mg/L. En los momentos donde el sistema de aireación funciono sin problema, se evidenció su influencia e importancia en los resultados de remoción e identificación del estado del lodo. Sin embargo las fallas eléctricas ocasionaban una rápida caída de las concentraciones de oxígeno a niveles de oxígeno cero, ocasionando problemas de olores.

DBO<sub>5</sub>: En los procesos de lodos activados es de suma importancia su seguimiento, debido a que la estimación del oxígeno gastado en la descomposición biológica, ayuda al dimensionamiento y las condiciones de operación del sistema (Winkler, 1993).

Los valores obtenidos por esta prueba no fueron lo suficientemente representativos, debido a inconvenientes en el procesamiento de las muestras por la dificultad para la elaboración inmediata de la prueba a causa de la disponibilidad del laboratorio.

Para efectos del diseño se tomaron los valores obtenidos en el laboratorio y donde los datos de DBO<sub>5</sub> no se tenían, se calcularon de acuerdo a la relación DBO/DQO calculada, éste valor fue cercano a la relación DBO/DQO para aguas residuales domésticas típicas de 0.5 (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001). Es otras palabras la materia orgánica biodegradable corresponde al 50% de la materia total oxidable.

DQO: La comparación de este parámetro con respecto a la normatividad se evaluó con el proyecto de norma que está en consideración de máximos permisibles propuesto por MAVDT; teniendo en cuenta que el decreto 1594 de 1984 no lo exige.

Para el caso del sistema de lodos activados con el afluente correspondiente al agua residual proveniente del reactor anaerobio RAP, la DQO a la salida del sistema estuvo en un rango entre 75.52 hasta 229.44 mg/L, sobrepasa en todos los casos el valor máximo permisible proyectado que es de 50 mg/L.

El sistema de lodos activados al operar con el afluente de la PTAR-UPB, logró concentraciones a la salida entre 24.64 mg/L a 218.19 mg/L. Aunque se realizaron modificaciones en el suministro de agua, el sistema cumple parcialmente con el proyecto de norma de valores máximos permisibles, a pesar de las remociones significativas.

Sólidos: El sistema a pesar de los diferentes inconvenientes en la recirculación del lodo y al vertimiento involuntario por el efluente, logró remociones en ST del 61.5%, y de STV del 88.08% (tabla 17).

**Tabla 17.** Valores obtenidos para sólidos totales y sólidos totales volátiles de la fase 1.

Día	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
	Afluente	Efluente	% Rem	Afluente	Efluente	%Rem
26	697	727	-4.30%	188	293	-55.85%
31	711	355	50.07%	242	150	38.02%
57	754	666	11.67%	460	406	11.74%
59	1156	444	61.59%	612	154	74.84%
61	946	778	17.76%	430	398	7.44%
68	1336	520	<b>61.08%</b>	738	88	<b>88.08%</b>

El comportamiento del sistema con respecto a la remoción de sólidos presentó una tendencia a mejorar con el tiempo de operación, mientras que, los ST permanecen uniformes a causa de las dificultades de operación, en cuanto al manejo de lodo en el sedimentador.

Índice Volumétrico de Lodo - IVL: Parámetro evaluado en el licor mixto del tanque de aireación, permite conocer la estabilidad del lodo y las características de sedimentabilidad basándose en una concentración inferior a 5000 mg/L, de sólidos totales volátiles. La buena sedimentabilidad de los lodos, se refieren a la capacidad del lodo de realizar una fácil y rápida separación de la biomasa con respecto al licor mixto (Orozco Jaramillo, 2005).

Para el cálculo del IVL, se tuvo presente la relación de SST/ST en el lodo, la cual fue igual a 94.25%, es decir los SST del licor mixto estudiado, en su gran mayoría corresponden a los ST, por ello, para el cálculo del IVL, el cual se hace con los SST, fue realizado con lo ST debido a su baja diferencia de concentración.

Al principio del estudio se encontraron valores de I.V.L. bastante bajos, inferiores a 20 mL/g (anexo 6), sin embargo, al momento de estabilizar el reactor con un tiempo de retención hidráulica de 6 horas, se contó con una concentración de 2231.250 mg/L de ST, con un I.V.L igual a 89.021 mL/g; siendo un lodo con buenas características de sedimentabilidad, lo que explica el aumento de los porcentaje de remoción de sólidos en el efluente.

Hay que tener presente que los valores recomendables para el I.V.L difieren según la concentración del lodo, por lo tanto, para lodos con concentraciones entre 800 y 3500 mg/L como es el caso de este sistema, los lodos con buena sedimentabilidad están comprendidos entre 150 y 35 mL/g de I.V.L (Ramalho, 1996).

Fósforo: Para los procesos de tratamiento biológico, es un nutriente necesario, hace parte de los requisitos nutricionales que proporcionan un ambiente adecuado y rico en nutrientes a los microorganismos encargados del tratamiento. Para el caso de sistemas de lodos activados, típicamente logra remover entre 10 y 30% del fósforo, dependiendo de la edad del lodo utilizado (Ramalho, 1996).

Según la caracterización típica de las aguas residuales domésticas, la concentración del fósforo se encuentra alrededor de 6.0 y 20.0 mg/L (Romero Rojas J. , 1999), sin embargo, el agua que se trató, entró al sistema con concentraciones hasta de 58.0 mg/L, siendo esta, la más alta y de 33.5 mg/L, la más baja, durante este periodo de estudio. (Tabla 19)

Dichas concentraciones superan el rango típico de las aguas residuales domésticas y son un riesgo para el sistema de tratamiento, generando condiciones

inocuas para el desarrollo de microorganismos, propios para la degradación de la materia orgánica y así mismo para la fuente receptora.

**Tabla 18.** Valores de fósforo obtenidos en la fase 1.

Día	FÓSFORO		
	Afluente	Efluente	% REM
57	9.54	11.49	-20.44%
59	39.5	24	39.24%
66	33.5	29.1	13.13%
68	<b>58</b>	40.7	29.83%

Fuente: Autor

En el día 57, la remoción fue negativa, a causa de fallas operacionales, correspondientes al suministro del agua residual que alimenta al sistema, este no fue constante el fin de semana, la capacidad del tanque de almacenamiento sólo lograba almacenar agua residual durante 8 horas, alimentando el sistema con un caudal de 362.08 ml/min, para un tiempo de retención hidráulico igual a 6 horas.

Para el día 59, el sistema logró 39.24% de remoción, no cumple con los objetivos trazados en el proyecto de norma de valores máximos permisibles, siendo 24 mg/L, la mínima concentración lograda a la salida del sistema, superando en 22 mg/L, la exigencia del proyecto de norma.

Al terminar el tratamiento del agua residual dichas concentraciones superiores a las permitidas resultan ser peligrosas para la fuente receptora. El fósforo juega un papel crítico en la eutrofización, generando a futuro la desestabilización en el ecosistema acuático. Por ello, para evitar afectaciones al ambiente, debe implementarse un sistema complementario o alternativa, que aumente los porcentajes de remoción y logre cumplir con un efluente, cuyas concentraciones en fósforo sean menores de 2 mg/L, como podrá ser exigido según en el proyecto de norma del MAVDT.

Es importante, determinar las causas del alto contenido de fósforo en el afluente de la UPB. Estas concentraciones pueden atribuirse esencialmente al aporte de detergentes utilizados en la limpieza realizada en el campus universitario (PTAR UPB, 2007), el cual debe replantearse y hacer conciencia dentro la institución, concentraciones tan altas a la entrada sobrecarga el sistema.

El cambio frecuente de detergentes usados, puede ser otra posible causa, actualmente no se cuenta con un producto de forma permanente, sino que varía cada vez que se adquieren los implementos de aseo en la Universidad; haciendo imposible la evaluación permanentemente de su composición. Se sugiere hacer

un control detallado y frecuente, para determinar el contenido de fósforo presente en los detergentes utilizados y evaluar otras posibles fuentes generadoras, como los residuos en los laboratorios.

Nitrógeno: Nutriente clave en el desarrollo de organismos del tanque de aireación del sistema de lodos activados, el exceso de este nutriente puede afectar las condiciones apropiadas para el tratamiento biológico, limitando las formas de vida y la degradación de la materia orgánica. Las concentraciones de nitrógeno total (NTK) del afluente del sistema de lodos activados estuvieron entre 132 y 210 mg/L (tabla 19), superando el rango típico de las aguas residuales domésticas cuya concentración de nitrógeno total está entre 30 y 100 mg/L (Romero Rojas J. , 1999).

**Tabla 19.** Valores de nitrógeno obtenidos en la fase 1.

Día	NITRÓGENO		
	Afluente	Efluente	% R
26	132.16	63	52.33%
57	56.56	14.56	74.26%
58	178	47.2	73.48%
59	210	40.32	80.80%
68	188.16	63	66.52%

Fuente: Autor

En el periodo evaluado la concentración del afluente entro en el rango de las aguas residuales típicas, con una concentración de 56.56 mg/L de N, esta concentración se obtuvo al tomar la muestra entrada la mañana, luego de dos días de descanso de la universidad, contando únicamente con la población universitaria que asistió en el periodo de vacaciones de la institución, por lo tanto, no fue el comportamiento regular del afluente en periodo laboral.

El sistema de lodos activados alimentado con altas concentraciones de nitrógeno, entre 132 y 210 mg/L, obtuvo remociones en NTK hasta de 80.80%, donde el sistema cumplía con todos sus requisitos de operación y mantenimiento reflejados en sus porcentajes de remoción, tales como población de bacterias nitrificantes y desnitrificantes, al igual que condiciones de oxígeno disuelto y carga orgánica apropiada, permitiendo oxidar, tanto el nitrógeno orgánico como el nitrógeno amoniacal, a los dos estados más oxidados de nitritos y nitratos (Gerardo, 1999), y así obtener remociones superiores al 52.33%.

A pesar de las buenas remociones de nitrógeno no se cumple con el proyecto de norma de valores máximos permisibles del MAVDT. La mínima concentración alcanzada por el sistema fue de 47.2 mg/L de N, superando las exigencias en 37.2 mg/L, concentración que afectaría sustancialmente las condiciones naturales de la

fuente receptora. Estas condiciones se verían afectadas con una concentración superior a 0.5 y 1.0 mg/L de NTK, variando según las características de cada cuerpo de agua y su capacidad de asimilación (Camargo & Alonso, 2007).

Se debe controlar las concentraciones de este nutriente, junto con las del fósforo, por jugar un papel importante en la eutrofización. Aparte de esta problemática, la presencia de nitrógeno en los cuerpos de agua, genera una demanda de oxígeno, que consume el oxígeno disuelto en la fuente receptora, causando un efecto perjudicial al ambiente, sin olvidar que el nitrógeno en sus diferentes formas resulta ser tóxico para el desarrollo de vida acuática (Ramalho, 1996). De ahí, la importancia de reducir los niveles de nitrógeno en el efluente del sistema, buscando alternativas que complementen el tratamiento de lodos activados, dando lugar al cumplimiento del proyecto del MAVDT, con una concentración máxima en el efluente de 10 mg/L.

En términos generales en el seguimiento de los diversos parámetros el sistema de lodos activados, bajo la configuración de un reactor convencional de mezcla completa, resulta ser un proceso de tratamiento eficiente en la remoción de material orgánico, El agua residual vertida después del tratamiento a la fuente receptora, suponiendo la implementación del sistema de lodos activados, aunque no cumpliría con la normatividad proyectada para los parámetros de nitrógeno y fósforo, constituye una muy buena alternativa como único tratamiento. En la tabla 20, se comparan los valores obtenidos en esta fase, con respecto los valores exigidos por normatividades mencionadas.

**Tabla 20.** Valores comparativos con la normatividad.

Parámetro	Valor	Valor exigido para instalación nueva	
		Decreto 1594 de 1984	Proyecto norma de 2010. MAVDT
pH	6.7 – 9.0 und	5 – 9 Und	6 – 8 Und
DQO	93.66% 218.19 mg/L	No aplica	200 mg/L
Nitrógeno	80.80% 47.2 mg/L	No aplica	10 mg/L
Fósforo	39.24% 24 mg/L	No aplica	2 mg/L

Fuente: Autor

En la aplicación del sistema de lodos activados cómo único tratamiento es importante la vinculación del sistema con otro tratamiento especializado en remoción de nutrientes para así aumentar las remociones de nitrógeno y fósforo.

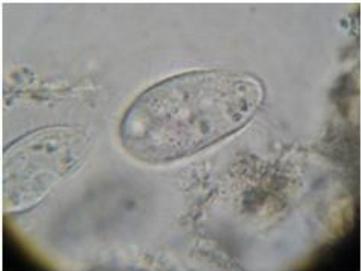
### Seguimiento microbiológico:

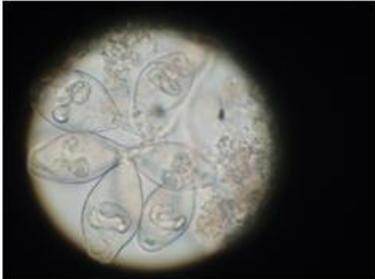
El estudio consistió en una observación directa, análisis cualitativo y registro fotográfico de 5 muestras, presentado en detalle en el anexo 7. Al ser un sistema biológico, se debe asegurar que las condiciones ambientales y de alimento sean las más apropiadas, para que los microorganismos puedan degradar la materia orgánica y hacer eficientemente el tratamiento del agua residual.

La importancia del seguimiento microbiológico, se basa en la valoración de la madurez, agrupación y movilidad de los organismos presentes en licor mixto, con la ventaja de encontrar organismos bioindicadores, como el caso de protozoos, los cuales son de gran utilidad para los ajustes operacionales del sistema.

Durante el mes de estudio, se encontró un lodo estable y maduro, peculiar debido a su composición en la microbiota y a las adversidades del sistema de aireación y suministro de alimento. En la tabla 21, se encuentran las observaciones generales realizadas para cada muestra.

**Tabla 21.** Observaciones seguimiento microbiológico.

MUESTRA	OBSERVACIONES
<p data-bbox="435 1066 625 1098"><b>Muestra No. 1</b></p>  <p data-bbox="386 1377 675 1444"><b>Género Uronema sp.</b> Objetivo 100 x</p>	<p data-bbox="748 1041 1442 1236">La muestra analizada se caracteriza por la abundancia de ciliados móviles o nadadores libres (<i>Uronema sp.</i>) que se caracterizan por ser bacteriófagos. También se observó predominio de un género de flagelado cuya fuente de alimento son las bacterias.</p> <p data-bbox="748 1241 1442 1308">El género <i>Opercularia sp.</i>, un indicador de bajas concentraciones de oxígeno.</p> <p data-bbox="748 1312 1442 1472">Aunque se observó una diversidad y abundancia de organismos del género <i>Vorticella sp.</i>, los organismos predominantes en la muestra analizada son los ciliados libres, flagelados, lo que indica una fase inicial de maduración del lodo estudiado.</p>
<p data-bbox="435 1478 625 1509"><b>Muestra No. 2</b></p>  <p data-bbox="375 1801 688 1869"><b>Género Tokophyra sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p data-bbox="748 1478 1442 1577">Se observó predominio de flagelados con movimiento visible en algunos individuos, pero en la mayoría no se evidenció locomoción.</p> <p data-bbox="748 1581 1442 1648">Se identificó abundancia de individuos del género <i>Linotus</i> con movimiento significativo.</p> <p data-bbox="748 1652 1442 1778">Los ciliados pedunculados sésiles del género <i>Vorticella sp.</i>, no fueron significativos en la muestra. Se observó predominio de ciliados succionadores del género <i>Podhophyra</i> y <i>Tokophyra</i>.</p> <p data-bbox="748 1782 1442 1850">Nota: El movimiento de los organismos fue muy reducido.</p>

<p align="center"><b>Muestra No. 3</b></p>  <p align="center"><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p>Se evidenció predominio de protozoarios ciliados sésiles, unidos al sustrato por pedúnculos y presencia significativa de metazoos microscópicos pertenecientes a la clase rotífera y nemátoda. Los anteriores organismos son bioindicadores de un fango de edad madura y estable.</p> <p>Sin embargo, se observó presencia de flagelados del tipo de las euglenas. Para esta muestra la presencia de organismos del género <i>Opercularia</i> es de menor cantidad.</p>
<p align="center"><b>Muestra No. 4</b></p>  <p align="center"><b>Clase Rotífera.</b> Objetivo 40 X</p>	<p>La microbiota predominante en la muestra analizada, corresponde a protozoarios ciliados sésiles pedunculados del género <i>Vorticella sp.</i>; se observaron individuos en proceso de reproducción asexual por conjugación. Cuando este género aparece en mayor cantidad, se asocia una buena aireación y funcionamiento estable del sistema.</p> <p>Además es importante tener en cuenta que se observaron abundantes individuos de la clase rotífera, pertenecientes a géneros diferentes. Lo cual indica un lodo maduro y estable.</p>
<p align="center"><b>Muestra No. 5</b></p>  <p align="center"><b>Género Vorticella sp., en conjugación.</b> Objetivo 40 X</p>	<p>La microbiota predominante en la muestra analizada, corresponde a protozoarios ciliados sésiles pedunculados del género <i>Vorticella sp.</i> Cuando este género aparece en mayor cantidad está asociada a condiciones de buena aireación y funcionamiento estable del sistema.</p> <p>Es importante tener en cuenta que se observaron abundantes individuos de la clase rotífera, perteneciente al género <i>Philodina sp.</i> y presencia de ciliados reptantes. Lo cual indica lodo maduro y estable.</p>

Fuente: Fotos tomadas al lodo de estudio por Claudia Santoyo, Licenciada en Biología, especializada en microbiología ambiental. Docente Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga

Estas observaciones determinan el comportamiento microbiológico del licor mixto, estableciendo falencias o exactitudes en las condiciones de operación. La relación entre el comportamiento microbiológico y físico-químico del sistema permite evaluar el proceso de una forma cualitativa, gracias al contraste entre los resultados obtenidos para algunos parámetro del seguimiento físico-químico, tales como los la remoción de materia orgánica y características de sedimentabilidad, presentados en la tabla 22.

**Tabla 22.** Comportamiento cualitativo de la microbiota con respecto al comportamiento físico-químico del sistema de lodos activados.

FECHA (Día)	ESTADO LODO	% REM DQO	I.V.L.	OBSERVACIONES
15/07/2011 (54)	Fase inicial de maduración	No fue posible tomar muestra del efluente, debido a problemas en la recirculación y vaciado en el sedimentador.		
18/07/2011 (57)	Movimiento de organismos reducidos	93.66%	89.021 ml/g	El suministro del agua residual que alimenta al sistema, no fue constante en los días del fin de semana. Debido a que la capacidad del tanque de almacenamiento sólo lograba almacenar agua residual durante 8 horas, trabajando con un caudal de 362.08 ml/min. Para un tiempo de retención hidráulico del sistema igual a 6 horas.
22/07/2011 (61)	Lodo en edad madura y estable	75.91%	68.431 ml/g	
29/07/2011 (68)	Lodo maduro y estable	93.38%	12.136 ml/g	La salida del tanque de aireación al sedimentador, se encontraba obstruida, por lo tanto, el licor mixto, se derramó por el mismo tanque de aireación. Clarificando el lodo presente en el tanque de aireación.
01/08/2011 (71)	Lodo maduro y estable	Funcionamiento del sistema estable, sin toma de efluente.		

Fuente: Autor

Con lo anterior se puede determinar que:

- En el tanque de aireación del sistema de lodos activados, operado a un tiempo de retención hidráulico de 6 horas, alimentado por el afluente de la PTAR-UPB, se logró una gran variedad de especies tales como flagelados, ciliados libres y rotíferos simultáneamente en el lodo, logrando sobrevivir entre ellos, estabilizando el sistema y alcanzando remociones del orden del 94% en DQO. La variabilidad de especies demuestra una biodiversidad microbiológica, la cual enriquece el tratamiento y permite la madurez del lodo en las diferentes etapas de transformación de este.
- La coloración y concentración del lodo, no es del todo un parámetro que permita interpretar el funcionamiento del sistema. Aún, cuando el sistema presentó fallas en la conexión del tanque de aireación con el sedimentador y el lodo se vertió por los laterales del tanque de aireación, se encontró una población

microbiana enriquecedora formando un lodo maduro y estable logrando remociones del 93.38% en DQO.

- Al presentar fallas en el suministro eléctrico y del afluente, los microorganismos se incorporaron en un estado de suspensión; según Carpenter los protozoarios se “alejan del mundo” cuando las condiciones se vuelven desfavorables y entran en un estado de inactividad (enquistamiento), ocasionado por el inadecuado aporte de alimento o suministro de oxígeno, estos quistes resultan ser más resistentes que las células vegetales y nulos de movimiento (Carpenter, 1979).

En la muestra 2, se encontró inactividad en los organismos; muchos estaban inmóviles, con una definición a su alrededor más gruesa y notoria no observada anteriormente; éste comportamiento fue generado por la ausencia de alimento, provisto por la interrupción del fluido eléctrico durante un día. Aunque, se afectó la movilidad de los organismos, las remociones logradas por el sistema fueron de 93.66% en DQO, con un I.V.L de 89.021 ml/g. Es decir, el sistema de lodos activados no tiene fuertes afectaciones con un día de suspensión, este tiende a recuperarse de estas ligeras fallas operativas.

Para esta misma muestra, la relación A/M fue igual a  $0.29 \text{ d}^{-1}$ , la insuficiencia del sustrato a causa de las fallas en el fluido eléctrico, inhibió el crecimiento microbiano permanente, obligando a los organismos a vivir bajo respiración endógena, con el propósito de sobrevivir a estas condiciones adversas, dificultando la sedimentación del lodo debido a sus capsulas ligeras y resistentes a este fenómeno (Ramalho, 1996); este comportamiento se evidenció al microscopio por sus formas gruesas y enquistamientos.

- El seguimiento microscópico del lodo, reveló que está formado por una población heterogénea de microorganismos, cada uno con funciones específicas que trabajan en una constante relación para la degradación de la materia orgánica, el cual, al encontrarse en condiciones estables de oxígeno y alimento, logran ser eficientes en su tratamiento.

- Durante el seguimiento no se evidenció presencia de bacterias filamentosas, aunque, la relación alimento-microorganismo - A/M, para el caso de la muestra 4 fue igual a  $0.84 \text{ d}^{-1}$ , según Ramalho en intervalos superior a  $0.6 \text{ d}^{-1}$ , es muy usual encontrar dichos organismos haciendo que la decantación del lodo sea mínima y este flote ocasionando el fenómeno conocido como bulking, típico en las plantas de lodos activados (Ramalho, 1996).

Finalmente, con las modificaciones realizadas y el seguimiento hecho durante este periodo de estudio, se determinó que el sistema de lodos activados logra significativas remociones operando bajo un tiempo de retención hidráulico igual a 6 horas y con un afluente de alta carga, manejando concentración de DQO

superiores a 400 mg/L (Romero Rojas J. , 1999), con la capacidad de tratar el total de DQO promedio generada en la UPB, igual a 788.16 mg/L.

Entre las condiciones de operación necesarias a definir en un sistema de lodos activados, se encuentra el tiempo de retención celular, el cual, corresponde a un parámetro operacional que permite controlar la actividad de los lodos, define el tiempo en que se renuevan los microorganismos en el sistema (Winkler, 1993). Sin embargo, debido a las dificultades en la recirculación del lodo y fallas operacionales mencionadas anteriormente, fue imposible su determinación en esta etapa del proceso.

Para determinar las condiciones operacionales del sistema de lodos activados, se analizaron los valores obtenidos en esta fase de estudio a través de los resultados de las pruebas de laboratorio. Se calculó la relación A/M, la carga orgánica volumétrica –COV, concentración de biomasa del reactor, los cuales se encuentran en el anexo 8, estos resultados se evaluaron con los recomendados en la tabla 23 y así se determinó el día en que el sistema tuvo el mejor comportamiento y sus remociones fueron cercanas al 94%.

**Tabla 23.** Parámetros de diseño y operación de un sistema de lodos activados.

Parámetro	Rango	Unidades
Carga volumétrica	800 - 2400	g DBO/m <sup>3</sup> *día
Relación A/M	0.2 – 0.6	g DBO / g SSVLM*día
Biomasa X	2500 – 4000	mg/L SSLM
Tasa Recirculación	25 – 100	%
Eficiencia	85 - 95	%

Fuente: (Romero Rojas J. , 1999)

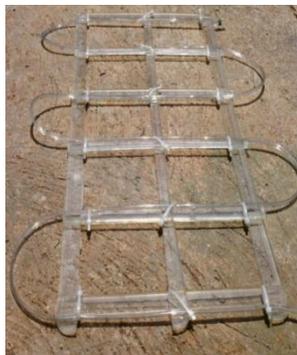
El tratamiento de lodos activados, durante el periodo de estudio, funcionó con una relación A/M promedio de 0.36, un COV promedio de 1085 g/m<sup>3</sup>d, y 2983 mg/L, de biomasa en el tanque de aireación, rangos recomendables por Romero Rojas, sin embargo, no se podría hacer un contraste con la normatividad ya que no sería lógico estimar un porcentaje de remoción promedio, debido a la variabilidad de los datos que se obtuvieron en DQO, por ello, es importante establecer un único día, en donde se cumplan los rangos recomendables para el sistema de lodos activados mezcla completa y se ajuste con la normatividad. Ese día, corresponde al día de operación 68, en donde el sistema trabajó con una concentración de biomasa igual a 1521.25 mg/L, logrando remociones de 97.75% en DBO<sub>5</sub>, 93.38% en DQO, una relación A/M igual a 0.8, COV de 1262.647 g/m<sup>3</sup>d. En este día, el afluente entro al sistema con una DQO de 1043.2 mg/L, logrando reducirla hasta 69.1 mg/L, cumpliendo con el proyecto de norma propuesto por el MAVDT

**Problemas presentados en el seguimiento:** Aunque el sistema se había provisto llevarlo a cabo, tal como se mencionó en la metodología. Durante este tiempo el sistema presentó diferentes inconvenientes que permitieron establecer prioridades en las condiciones de operación tales como:

⇒ Sistema de Aireación: El sistema de aireación debe garantizar la homogenización del lodo con el agua residual, esto producirá un buen licor mixto, evitando que el lodo sedimente en el tanque de aireación.

En un inicio el sistema de aireación estuvo conformado por un aireador de manguera micro-perforada, (figura13), sin embargo, la presión del equipo para este tipo de distribución no logró una homogenización del lodo en el tanque de aireación, produciendo dificultades operacionales. Estas fallas por la presencia de luz solar promovieron el crecimiento de algas (figura 14). Esta condición en el reactor perjudica las condiciones ambientales del tratamiento disminuyendo su eficiencia, adicionalmente genera olores desagradables.

**Figura 13.** Flauta de manguera para la distribución homogénea de aire.



Fuente: Autor

**Figura 14.** Generación de lama en las paredes del tanque de aireación debido a inconvenientes en la aireación y agitación.



Fuente: Autor

Las fallas se corrigieron cambiando el sistema de distribución de aire por atreves de un tubo de PVC, obligándolo a chocar contra las paredes y el suelo del reactor, de esta forma, se mantuvo la masa de agua agitada de forma constante (Figura 15).

**Figura 15.** Agitación y aireación del licor mixto en el tanque de aireación.



Fuente: Autor

La aireación y la agitación resultan claves en el éxito del sistema de lodos activados, son el principio básico del funcionamiento del proceso. Así mismo es importante considerar el tamaño de la burbuja generada, puesto que burbujas de menor tamaño, logran una mejor transferencia de oxígeno haciendo eficiente el sistema de aireación, por consecuencia, el tratamiento (Metcalf & Eddy, Inc, 1996).

⇒ Sistema de Recirculación de Lodo: La recirculación del lodo es un aspecto a tener en cuenta, el cual garantiza la renovación de las simientes y asegura la homogeneidad del lodo para lograr una adecuada estabilización aerobia de la materia orgánica.

La incorrecta recirculación del lodo, por periodos largos en el sistema de lodos activados, suele generar espuma de color blanca en la superficie del tanque de aireación y acumulación de lodo suspendido en el sedimentador como se observa en la figura 16, el lodo que se acumula en la superficie del sedimentador, escapándose por los vertederos junto con el efluente, lavándose de esta forma el lodo.

**Figura 16.** Lodo acumulado en la superficie del Sedimentador.



Fuente: Autor

Para evitar que el lodo se lavara fácilmente y que la recolección del lodo sedimentado fuese más eficiente, se ubicó una pantalla en el sedimentador (figura 17), con el fin de concentrar la mayoría del lodo en una sola parte del sedimentador y de allí succionarlo para ser bombeado al tanque de aireación, lo más concentrado posible. Con el uso de esta pantalla, se mejoraron los inconvenientes de la recirculación del lodo, dando mejores resultados y calidad en el efluente.

**Figura 17.** Ubicación de pantalla en el sedimentador.



Fuente: Autor

Un aspecto importante en la recirculación del lodo, es la capacidad de la bomba usada, el caudal requerido y la densidad del lodo. La bomba utilizada tenía una capacidad de 18.3 LPH, el caudal manejado fue inferior a  $0.3 \text{ m}^3/\text{d}$  y la densidad del lodo superior a la del agua, obstruyendo las mangueras y el sistema de bombeo hasta dejar de funcionar, por tal motivo constantemente se debía realizar la recirculación de forma manual y hacer una revisión del funcionamiento de la bomba.

⇒ Fallas eléctricas: El proceso de lodos activados resulta ser un sistema vulnerable a estas fallas, es fundamental asegurar la constancia en la aireación y el suministro del agua residual a tratar para obtener un buen desempeño del sistema.

Durante el periodo de estudio se presentaron episodios en donde la electricidad en el plantel educativo falló, el sistema quedó completamente sin fluido eléctrico. Esto produjo que las condiciones de operación del reactor no cumplieran su objetivo de tratamiento. Los efectos de esta falla generaron en varias ocasiones un lavado involuntario del lodo, una disminución en la microbiota del licor mixto, taponamiento de las bombas, entre otros aspectos que obligaron a re-inocular el sistema. En este tipo de tratamientos, tan dependientes a la energía, se sugiere contar con un sistema complementario de electricidad para asegurar el funcionamiento del proceso y poder tener remociones significativas y constantes.

### **Consideraciones finales de la fase 1 y condiciones de arranque de la fase 2:**

Una vez ajustados los diferentes inconvenientes operacionales presentados, el proceso de lodos activados, resulta ser, un tratamiento con capacidad de actuar como sistema secundario de la PTAR-UPB. Si bien, no alcanza las expectativas de tratamiento en cuanto a la remoción de nutrientes, producto de las elevadas concentraciones de estos en el afluente, (supera los valores típicos de las aguas residuales domésticas), se podría complementar con un proceso el cual centre su atención en la remoción de nutrientes y logre el cumplimiento de la normatividad.

Como una propuesta para tratar los nutrientes, se propone la inclusión de plantas acuáticas, como el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) en el sedimentador y así complementar el sistema de lodos activados. Esta mezcla entre un sistema biológico, como el de lodos activados con un tratamiento acuático como el uso de plantas flotantes, podría incrementar los porcentajes de remociones tanto de nitrógeno como de fósforo y hacer un tratamiento más completo.

La vinculación de estos dos tratamientos, requiere su propia evaluación y para el inicio de ésta, se contó, con una nueva inoculación de lodo proveniente del ICP,

con características descritas en la tabla 24. Asegurándose de haber corregido los problemas operacionales y de diseño que se presentaron a lo largo de la fase 1.

El arranque de la fase 2, se realizó con una concentración de 4065.2 mg/L, de ST en el tanque de aireación; manteniendo las condiciones de arranque de la fase 1, con el fin de garantizar igualdad en la operación del sistema, corrigiendo las fallas presentadas.

Luego de la adición del inóculo y al completar el tiempo de llenado del tanque sedimentador por el afluente a tratar, se incluyeron ejemplares de buchón de agua, tomadas del sistema terciario de la PTAR-UPB y así completar el ciclo de tratamiento para el arranque de la fase 2 en el sistema.

**Tabla 24.** Caracterización inóculo FASE 2.

PARÁMETRO	3 DE AGOSTO DE 2011 Día de operación: 73	
	VALOR	UNIDADES
Volumen lodo [ ]	70	L
ST	7570	mg/L
STV	4405	mg/L
% de STV en ST	58.19	%
Densidad	0.98908	g/mL
Sólidos sedimentables	600	mg/L
IVL	79.26	mL/g
Condiciones en el Tanque de Aireación		
Volumen T.A.	130.35	L
Masa	529900	mg
[ ] Agregada al T. A	4065.2	mg/L

Fuente: Autor

**Fase 2: Evaluación de la inclusión de Buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) para la remoción de nutrientes en el sedimentador del sistema de lodos activados.**

Esta fase tuvo una duración aproximada de 2 semanas, en este tiempo se realizó un seguimiento diario en los parámetros de DQO, P, N y peso del buchón de agua, se continuo con la evaluación de los otros parámetros con la frecuencia indicada en la fase 1, cuyos valores obtenidos se encuentran en el anexo 9.

En la figura 18 se observa el montaje del reactor de lodos activados-sedimentador, con la inclusión del buchón de agua empleado en esta fase.

**Figura 18.** Buchón de agua adaptado y reproduciéndose en las condiciones de operación del sistema de lodos activados-sedimentador.



Fuente: Autor

Partiendo de los resultados de la fase 1, respecto a la cantidad de alimento disponible en relación a la biomasa del reactor de lodos activados, para esta fase se hizo el seguimiento de la relación Alimento-Microorganismos (A/M) en contraste con el IVL, para una mejor interpretación. Los valores se presentan en tabla 25.

En general para que un lodo tenga condiciones óptimas en la sedimentación, debe contar con un I.V.L bajo; esto se presenta para una relación A/M para el agua residual doméstica en un rango entre 0.3 y 0.6 d<sup>-1</sup> según Ramalho, 1996, en la segunda fase, ésta relación logró tenerse más estable.

**Tabla 25.** Valores típicos del índice volumétrico de lodos y relación alimento/microorganismo de la fase 2.

Día	A/M	I.V.L
	mgDBO / mgSTV*d	mL/g
75	0.49	68.69
78	1.19	143.86
80	0.35	128.61
87	0.28	57.07
89	0.57	111.42

Fuente: Autor

### Seguimiento de la DQO , N y P en la segunda fase

DQO: los valores de DQO se reportan en la tabla 26, los cuales permiten definir una tendencia en cuanto a las remociones presentadas por encima del 80%.

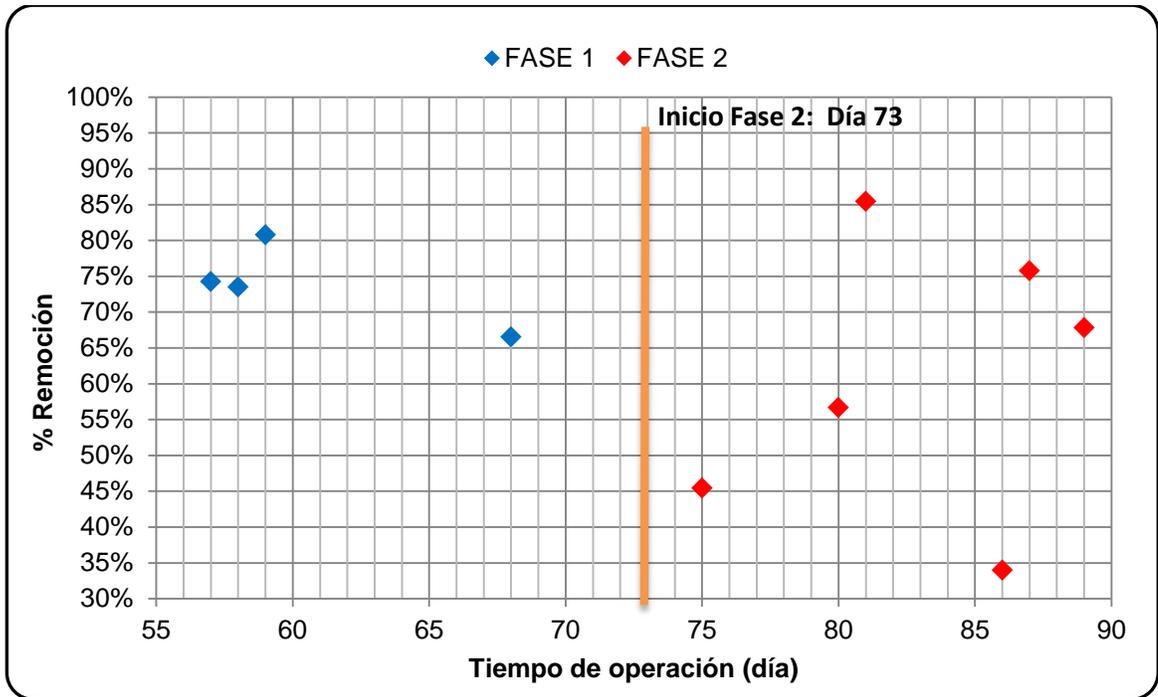
**Tabla 26.** Valores de DQO en la fase 2.

Día	DQO (mg/L)		
	Afluente	Efluente	% Remoción
75	685.6	101.1	85.25%
78	600.7	62.7	89.56%
80	438.4	52.5	88.03%
81	464.8	60.2	87.06%
86	572.0	55.7	90.27%
87	382.1	11.0	97.11%
88	655.2	45.4	93.02%
89	631.4	11.2	98.23%
94	532.0	68.7	87.08%

Fuente: Autor

Nitrógeno: En cuanto al nitrógeno, el sistema de lodos activados – sedimentador, al momento de incluir las plantas acuáticas no tuvo remociones en nitrógeno total muy diferentes a las alcanzadas en la fase 1. Como se evidencia en la figura 19, las remociones están distribuidas entre un rango en 30 y 85% para la fase 2, mientras en la fase 1 se mantienen superiores al 65%.

**Figura 19.** Comportamiento de la remoción del Nitrógeno. Comparación Fase 1 – Fase 2.



Fuente: Autor

En la fase 1 se logró un efluente con concentración máxima de 63 mg/L de NTK y una mínima 40.32 mg/L de NTK, presentadas en la tabla 27, mientras que en la fase 2 la concentración máxima en el efluente fue igual a 113.68 mg/L de NTK reportado el día 75, luego de un día de tratamiento con el buchón de agua, para el día 86 el sistema logró una disminución mayor, con una concentración mínima en el efluente de 27.4 mg/L de NTK.

Con remociones hasta del 85%, el sistema no cumple con las exigencias del proyecto de norma de valores máximos permisibles del MAVDT, superando los 10 mg/L de NTK, concentración admitida para este nutriente. Por lo tanto, no se evidencia ninguna mejora en el tratamiento al momento de incluir el buchón del agua al tanque sedimentador del sistema de lodos activados.

**Tabla 27.** Valores de nitrógeno obtenidos en la fase 2.

Día	NITRÓGENO		
	Afluente	Efluente	% Remoción
80	222	96.2	56.67%
81	244	35.5	85.45%
82	135	156	-15.56%
86	41.5	27.4	33.98%
87	299	72.4	75.79%
88	143	109	23.78%
89	170	54.7	67.82%

Fuente: Autor

Fósforo: La concentración del fósforo a la entrada de la planta presentó concentraciones entre 25 y 60 mg/L, presentados en la tabla 28; estas concentraciones altas requieren una exigencia mayor en el tratamiento, para obtener valores admisibles en el efluente.

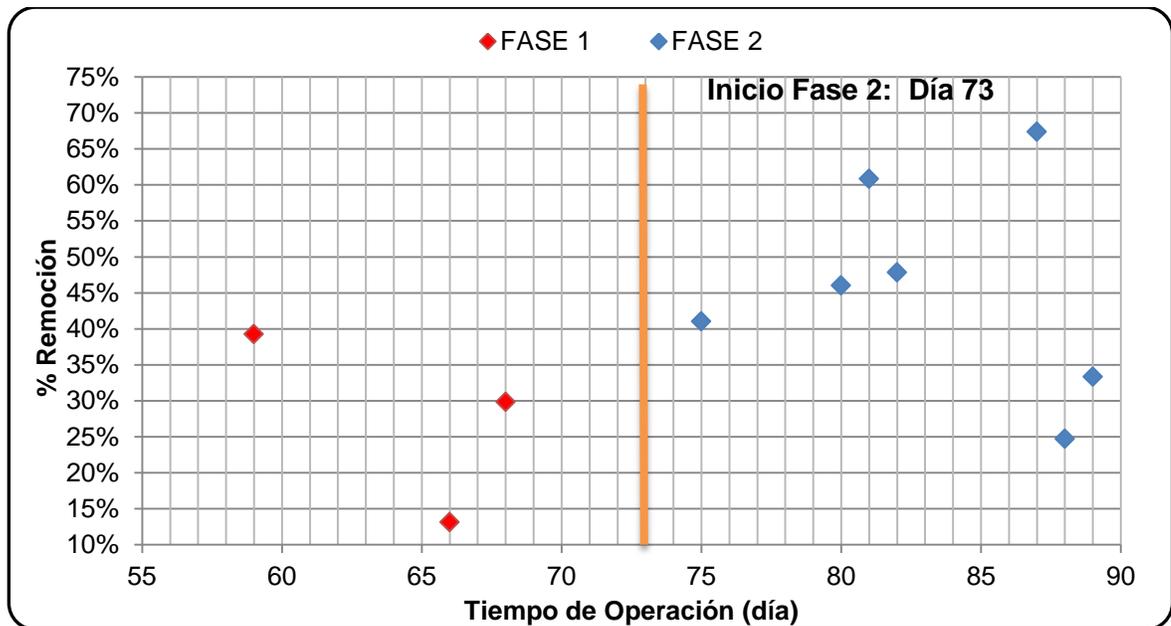
**Tabla 28.** Valores de fósforo obtenidos en la fase 2.

Día	FÓSFORO		
	Afluente	Efluente	% Remoción
80	50	27	46.00%
81	60	23.5	60.83%
82	46	24	47.83%
86	35	49	-40.00%
87	46	15	67.39%
88	44.5	33.5	24.72%
89	36	24	33.33%

Fuente: Autor

En la fase 1, la remoción máxima del fósforo fue de 29.83%, sólo con el funcionamiento y la capacidad de asimilación propia del sistema de lodos activados, al incluir las plantas acuáticas, se logró una mejora alcanzando remociones hasta del 67.7%, como se observa en la figura 20, comprobando que el buchón de agua incrementa las remociones de fósforo.

**Figura 20.** Comportamiento de la remoción del fósforo. Comparación Fase 1 – Fase 2.



Fuente: Autor.

Aunque la inclusión del buchón de agua, favorezca las remociones de fósforo, el sistema supera el proyecto de norma de valores máximos permisibles del MAVDT en 13 mg/L; con una concentración mínima en el efluente de 15 mg/L; indicando que se puede exponer a la fuente receptora a riesgos ecológicos como se mencionó anteriormente.

El comportamiento del sistema en sus puntos máximos en el efluente, obtuvo remociones en DQO del 93.01% con una concentración de 74.24 mg/L, remociones del 85.45%, con una concentración de 35.5 mg/L en NTK, y en cuanto al P una remoción del 67.39% con concentración del 15 mg/L; cumpliendo con la normatividad del proyecto de norma únicamente en DQO, puesto que, el decreto 1594 de 1984 no exige ninguno de estos tres parámetros.

Es importante destacar que el nitrógeno y el fósforo son parámetros que no son exigidos en la normatividad de vertimiento a la que hace referencia el Decreto 1594 de 1984; por ende, sólo es posible su comparación con el proyecto de norma del MAVDT. Aunque actualmente no se incumple con la normatividad, previendo la aprobación del proyecto de norma, la UPB si no hace los correctivos necesarios podría incumplir en éstos parámetros.

La inclusión de plantas acuáticas como el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), en el sedimentador del sistema de lodos activados, no presentó grandes diferencias en la remoción de nutrientes, con respecto al sistema convencional estudiado en la fase 1; por lo tanto, aún con las modificaciones elaboradas al sistema, la descarga del efluente a una fuente superficial resulta peligrosa, por las altas concentraciones mencionadas de estos nutrientes.

El buchón de agua contó con un área de contacto aproximada de 0.2 m<sup>2</sup> y un TRH no mayor a 3 horas, dichas condiciones de operación, dificultaron la asimilación de los nutrientes, se evidencia que es recomendable realizar una evaluación del buchón de agua en el sedimentador de un sistema de lodos activados por mostrar parcialmente resultados; sin embargo, para asegurar mayor credibilidad de los mismos repetir el experimento con mayor área y TRH en el sistema, para establecer la condición óptima aplicable.

En relación a la asimilación de nutrientes y el crecimiento de las plantas, monitoreado con el peso de la planta producido para garantizar condiciones constantes de operación, en las labores de mantenimiento (Figura 21), se retiraron las plantas que presentaron deterioro, específicamente hojas quemadas, partidas o que su raíz estuviera de color negro, violáceas, características de las plantas adultas (Infojardín). En la tabla 29 se reportan el crecimiento de la planta.

**Figura 21.** Actividades de mantenimiento y cosecha del buchón de agua.



Fuente: Autor

**Tabla 29.** Remoción de nutrientes y crecimiento del buchón de agua.

Fecha	N	P	Crecimiento en Kg del Buchón de Agua	Peso Inicial Kg
	% Rem	% Rem		
74	Inclusión del buchón de agua al sedimentador.			0.63
75	45.43%	41.03%	0.03	0.66
80	56.67%	46.00%	0.07	0.73
81	85.45%	60.83%	0.2	0.93
82	-15.56%	47.83%	0.03	0.96
86	33.98%	-40.00%	0.24	1.2
87	75.79%	67.39%	0.15	1.15
88	23.78%	24.72%	0.2	1.2
89	67.82%	33.33%	0.18	1.18

Fuente: Autor

La necesidad de la cosecha del buchón de agua a diario es necesaria teniendo en cuenta los datos presentados en la tabla 30 y los siguientes aspectos:

- Al hacer cada 3 días labores de mantenimiento y cosecha (fines de semana) se observa que se puede generar un incremento de nutrientes a la salida del sistema. Puntualmente el día 82 la concentración de nitrógeno del efluente aumento respecto al afluente aproximadamente en 21 mg/L de NTK (15,6%), situación similar se presenta el día 86, con un incremento del 40% para el fósforo a la salida del sistema, con una aumento de la masa en los tres días en 0.24 Kg.
- Los casos presentados de aumento en la concentración de N y P del sistema, corresponden a la ausencia en las labores de cosechamiento y mantenimiento de las plantas del sedimentador de forma diaria, por lo cual se presume la rigurosidad diaria de mantenimiento, la literatura reporta que ésta situación se presenta por el envejecimiento del buchón y la saturación de nitrógeno en el sistema, por lo tanto, su actividad de absorción de nutrientes disminuye considerablemente hasta que comienzan a liberar los nutrientes absorbidos nuevamente, haciéndolos solubles y representativo en la descarga. (WINKLER, 1993)
- Otro problemas evidenciado en la operación en la agrupación forzada de las planta en la superficie del sedimentador, haciendo que una fracción del lodo sedimentado entrara a descomponerse anaeróbicamente, por falta de intercambio de oxígeno. Adicionalmente estimula la acumulación del lodo en las raíces puede generar que los microorganismos que se encuentran allí no asimilen adecuadamente los nutrientes, acortando de esta manera la vida de las plantas y perjudicando la absorción de los nutriente dispuesto en el agua.

Con la finalización de la fase dos, de manera general se encontró la importancia de integrar dos sedimentadores en el sistema de lodos activados convencional. La

primera con el propósito de hacer una mayor captura del lodo, (para facilitar la recirculación), la otra parte estaría destinada para una sedimentación del lodo en menores cantidades y allí estarían dispuestas las plantas flotantes encargadas de la absorción de los nutrientes de interés.

Es sumamente importante disponer de un área y T.R.H mayor, una recirculación del lodo constante, para así establecer la relación entre el crecimiento de las plantas con respecto a las remociones obtenidas. Esta evaluación del sistema y del buchón de agua, permitiría obtener datos de análisis representativos los cuales arrojen una tendencia en el comportamiento del proceso de lodos activados en conjunto con el tratamiento acuático por parte del buchón de agua. La mayor escala disminuiría las dificultades presentadas en la simulación a escala de laboratorio.

### **Fase 3: Determinación de los parámetros de diseño, para el dimensionamiento del sistema de lodos activados.**

Para esta determinación, se tomaron los valores obtenidos en el periodo de estudio correspondiente a la fase 2; donde el sistema se encontró más estable, gracias a las modificaciones que se realizaron, proporcionando condiciones operacionales y ambientales más favorables para la determinación de estos coeficientes cinéticos.

Aunque no fue posible operar el sistema de lodos activados en diferentes tiempos de retención celular por los problemas de recirculación que presento la escala a laboratorio, con el fin de aplicar la metodología propuesta por Metcalf & Eddy, Inc (1996), para el cálculo de los coeficientes cinéticos del sistema, se calcularon con la elaboración de gráficas provenientes de las ecuaciones presentadas en la tabla 11 de la metodología. Los resultados se presentan en la tabla 30.

Para la realización de las gráficas, se toman los valores de la tabla 30 y se realizan los cálculos correspondientes mostrados en la tabla 31, en base a la interpretación de diferentes ecuaciones presentadas por Metcalf & Eddy, Inc (1996), las cuales permiten el análisis del comportamiento cinético de los microorganismos, en el sistema.

Con las tabla 31 surgen las gráficas necesarias para la obtención de los coeficientes cinéticos. La consolidación de los datos se presentan en las figuras 27 y 28, cada una de estas reporta una tendencia, de donde se determina los valores de constante de saturación, tasa máxima de remoción de sustrato por unidad de masa de microorganismos, coeficiente de producción de crecimiento y el crecimiento de respiración endógena, reportados en la tabla 33.

**Tabla 30.** Datos de la fase 2, usados para la determinación de coeficientes cinéticos.

Fecha	T.R.H (días)	[X] T.A.	So	Se	$\theta_c$
		mg/L	mg/L	mg/L	(días)
89	0.25	3502.50	631.4	11.2	9.73
87	0.25	3249.10	455.2	45.4	4.14
78	0.25	1746.25	600.7	62.7	2.91

Fuente: Autor

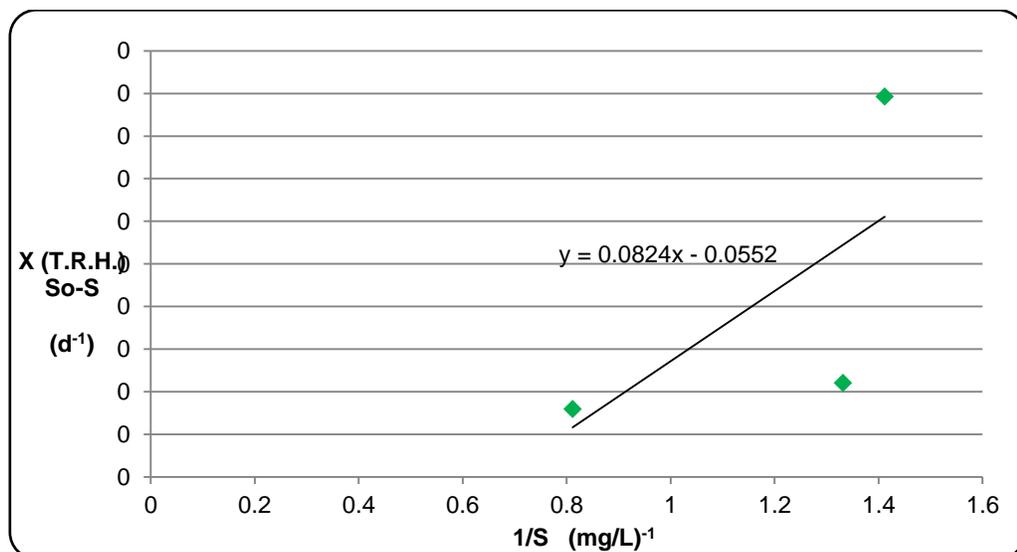
**Tabla 31.** Cálculos para la realización de gráficas.

DÍA	$\frac{1}{\theta_c}$	$\frac{So-S}{X \cdot TRH}$	$\frac{X \cdot TRH}{So-S}$	$\frac{1}{S}$
	día <sup>-1</sup>	día <sup>-1</sup>	día	mg/L <sup>-1</sup>
89	0,10277492	0,70829408	1,41184295	0,08928571
87	0,24154589	0,75073097	1,33203509	0,02202643
78	0,34364261	1,23235505	0,81145446	0,01594896

Fuente: Autor

En la figura 22, la ecuación de la recta es  $Y = 0.0824X - 0.0552$ , el punto de corte representa el inverso de K, por lo tanto  $K=18.81d^{-1}$ , la pendiente representa  $Ks/K$ , por lo tanto  $Ks = 1,5 \text{ mg/l}$ , lo cual representaría la concentración del sustrato a la que alcanza una tasa de crecimiento igual a la mitad de la máxima (Unavarra, 2008).

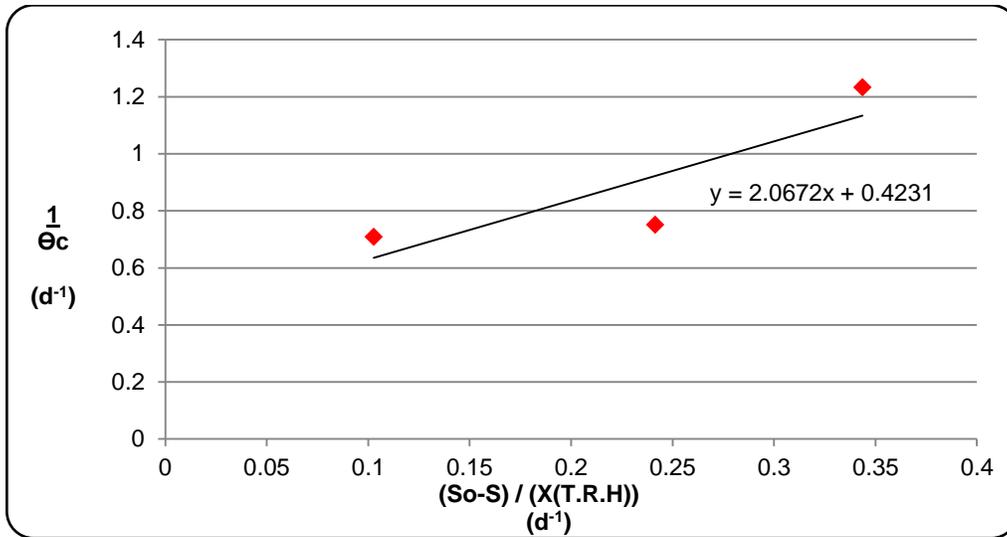
**Figura 22.** Obtención de k y Ks.



Fuente: Autor

Con la figura 23, se obtiene una recta con ecuación  $Y = 2.0672X + 0.4231$ , cuya pendiente es el valor del coeficiente de producción de crecimiento, “Y” igual a 2.0672, representando la producción de lodo biológico por kilogramo de sustrato consumido (Ramalho, 1996), y la ordenada en el origen es el coeficiente de respiración endógena,  $K_d$  igual a 0.4231 día<sup>-1</sup> coeficiente que indica la disminución de la masa celular por respiración endógena, en otras palabras, el sistema bajo estas condiciones no alcanza una estabilidad en la población microbiana, morirán más organismos de los que se logran desarrollar bajo este tipo de operación.

**Figura 23.** Obtención de Y y  $K_d$



Fuente: Autor

El valor de “Y” también es ilógico, éste valor máximo toma un valor de 1, (típico de las aguas residuales domésticas de 0.4 y 0.8 para sistemas aerobios);

La determinación de los coeficientes cinéticos con la metodología empleada no fue posible, la dificultad de la escala, básicamente en la recirculación del lodo biológico, no permitió tener condiciones de biomasa estable en el reactor, que permitan calcular las constantes y por ende se reafirma la necesidad de realizar el estudio en una escala mayor, para poder estimar con precisión la cinética del reactor de lodos activados tratando éste tipo de agua residual.

#### **Fase 4: Dimensionamiento de un sistema de lodos activados tomando como referencia los canales empleados en el sistema terciario PTAR-UPB**

El sistema terciario de la PTAR- UPB actualmente está funcionando únicamente con el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), como tratamiento acuático y cuenta con las dimensiones presentadas en la tabla 32. El caudal que se maneja aproximadamente en la PTAR-UPB es de 2.053LPS, según monitoreos hechos por los operadores de la PTAR.

**Tabla 32.** Dimensiones sistema terciario PTAR-UPB.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADES</b>
PROFUNDIDAD	0.8	m
ANCHO	0.9	m
LONGITUD	127.95	m

Fuente: Adaptación planos PTAR-UPB

Con el propósito de mejorar el tratamiento del agua residual generada por la universidad y teniendo en cuenta los resultados de las anteriores fases, fue posible determinar las dimensiones necesarias para la implementación del sistema de lodos activados-sedimentador, en los canales en donde se encuentra actualmente el sistema terciario de la UPB. Aunque no se tuvieron las ecuaciones cinéticas, las cuales me permiten determinar la biomasa producida en el tiempo, se hará el ejercicio de calcular el sistema, teniendo en cuenta el tiempo de retención celular que mostró bondades en el tratamiento.

La conversión de los canales a un reactor de lodos activados tendrá dos segmentos, el primero funcionará como tanque de aireación, en donde se concentrará toda la actividad microbiológica, encargada de la degradación de la materia orgánica y el segundo, corresponderá al sedimentador, el cual funcionará simultáneamente con la absorción de nutrientes por parte del buchón de agua.

En la tabla 33 se encuentran dichos resultados, condiciones de operación y diseño más relevantes, con el propósito de establecer las dimensiones y parámetros que permitan ubicar el tratamiento de lodos activados-sedimentador en los canales del sistema terciario.

**Tabla 33.** Condiciones operacionales del sistema de tratamiento de lodos activados –sedimentador.

PARÁMETRO		VALOR	UNIDADES
Tiempo de Retención Hidráulico	T.R.H	6	Horas
Tiempo de Retención Celular	$\theta_c$	9.73	días
Relación Alimento / Microorganismo	A/M	0.21	$\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ de DBO $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$ de STV . día
Carga Orgánica Volumétrica	COV	872.75	$\frac{\text{mg}}{\text{L . día}}$
Biomasa Tanque de Aireación	X	3500	mg/L
Biomasa de Recirculación	Xr	14415	mg/L
Porción de volátil de los sólidos totales		65.34	%

Fuente: Autor

Las dimensiones generales del proceso de lodos activados en los canales se encuentran en la tabla 34 haciendo uso de ecuaciones básicas, presentes en el anexo 2.

**Tabla 34.** Dimensiones de un sistema de lodos activados en los canales del sistema terciario PTAR-UPB.

DIMENSIONAMIENTO EN LOS CANALES		
TANQUE DE AIREACIÓN		
VOLUMEN	44.3448	m <sup>3</sup>
LONGITUD	61.59	m
T.R.H.	6	Horas
SEDIMENTADOR		
LONGITUD	66.36	m
VOLUMEN	47.7792	m <sup>3</sup>
ÁREA SUP.	59.724	m <sup>2</sup>
T.R.H	6.5	Horas

Fuente: Autor

A parte de la dimensión del sistema de lodos activados-sedimentador en los canales, es importante definir criterios de operación, mantenimiento y aspectos de funcionamiento, que garanticen el adecuado funcionamiento del tratamiento y se mantengan las remociones obtenidas experimentalmente.

Como se había mencionado el sistema, contará con dos segmentos y para cada uno de ellos se recomienda las siguientes especificaciones:

*Tanque de aireación:* Se desarrollará en un tramo de 62 m de los canales, es la etapa clave del sistema de lodos activados, por lo tanto, se debe asegurar un sistema de aireación, el cual logre transferir oxígeno eficientemente.

Se sugiere que el sistema de aireación este conformado por difusores porosos, distribuidos homogéneamente en el fondo del canal, asegurando que todos los puntos del tanque aireación cuenten con la misma concentración de oxígeno disuelto y se logre la mezcla dentro del reactor.

El tamaño de la burbuja que arroja este tipo de difusor, resulta ser una ventaja ya que al ser una burbuja de tamaño pequeño asegura una mejor transferencia de oxígeno (Metcalf & Eddy, Inc, 1996), haciendo que el proceso sea eficiente en la degradación de la materia orgánica y por ende obteniendo mejores resultados.

Las condiciones de oxígeno resultan ser esenciales para este tratamiento, sin embargo, se debe tener presente eventos que puedan ocasionar un lavado del lodo, como las precipitaciones, corrientes de aire. Al ubicar el proceso de lodos activados en los canales, estará expuesto a estos eventos, para el caso de una fuerte precipitación puede aumentar el volumen en el tanque de aireación reduciendo el T.R.H y por ende el lodo se estanque en el sedimentador o en su efecto sea vaciado a la salida del sistema, disminuyendo la biomasa en el tanque de aireación. Por lo tanto se recomienda estudiar la influencia del clima, en especial de las precipitaciones sobre el licor mixto, presente en el tanque de aireación del sistema de lodos activados, si afecta o no y como se podría controlar, de tal forma que se beneficie el sistema.

*Sedimentador:* Este contará con una longitud aproximada de 67 m, con un área disponible de 60 m<sup>2</sup>, para que el agua residual proveniente del tanque de aireación entre en contacto con las raíces del buchón de agua, en un tiempo de retención hidráulico igual a 6.5 horas. Aumentando el T.R.H, se espera superar las remociones de nitrógeno y fósforo obtenidas en la fase 2, siendo que el T.R.H se duplicaría y el área de contacto sería 300 veces mayor que en la escala trabajada.

El aspecto más importante en el sedimentador es la recirculación del lodo al tanque de aireación, en forma permanente y con caudales controlados. Se sugiere el uso de bombas capaces de manejar los caudales de recirculación requeridos, la densidad e impulso del lodo, tales como bombas tipo embolo,

cavidad progresiva, centrifuga no atascante, flujo rotativo, entre otras (Romero Rojas J. , 1999), teniendo en cuenta las características del lodo con el fin de evitar obstrucciones y recirculación de un lodo diluido.

Para garantizar un mayor éxito y facilitar la recirculación el sedimentador debe contar con pantallas como mecanismo de remoción y atrape del lodo de mayor concentración, para de esta forma capturarlo y hacer el proceso de recirculación y la respectiva disposición final.

En el sedimentador mantener un flujo lento es importante, con el fin de evitar que se desestabilicen los flóculos formados y perjudique la sedimentabilidad del lodo, así mismo la calidad del efluente, para ello se recomienda que la entrada del agua al sedimentador sea menor que 0.6 m/s, (Romero Rojas J. , 1999).

Actividades de operación y mantenimiento: Existen 2 actividades fundamentales para evitar dificultades que perjudiquen el funcionamiento y resultados del tratamiento. Actividades claves y esenciales para el proceso de lodos activados-sedimentador, haciendo uso del buchón de agua.

**1. Purga de lodos:** El sistema de lodos activados, bajo las condiciones de operación en las que se basó el dimensionamiento, contará diariamente con lodo de desecho de aproximadamente 3260 L. El peso seco de este lodo es de 5.4 Kg. Es un lodo, compuesto por materia orgánica removida del agua residual que eventualmente entra en descomposición y se convierte en un lodo indeseable.

La cantidad de lodo generada diariamente por el sistema, se convierte en un problema de manipulación, ya que, lograr llegar a la concentración máxima de los sólidos con el propósito de reducir todo su material orgánico en estas cantidades, resulta ser un trabajo tedioso y que a su vez puede incrementar algunos costos operacionales y de tratamiento, que se deben considerar.

Para el tratamiento de estos lodos se propone el método de secado de lodos, en donde se reduce el contenido de agua, al menos en un 85%, teóricamente.

**2. Cosecha del buchón de agua:** Para un aumento en la absorción de nutrientes, por parte del buchón de agua, se deben realizar actividades de cosecha y mantenimiento, periódicamente, debido a que un amontonamiento de estas en la superficie del sedimentador puede causar concentraciones mayores en el efluente y perjudicar las condiciones aerobias del lodo de desecho. Se podría continuar con la metodología de cosecha y tratamiento realizada actualmente por los operarios de la PTAR. En donde las plantas retiradas del sistema son tratadas por medio de elaboración de compost.

Con el fin de profundizar y conocer el comportamiento del sistema de lodos activados-sedimentador en una escala que permita el manejo y control de las

dificultades presentadas en el transcurso de este estudio, se recomienda, una evaluación en una sexta parte de la totalidad de los canales, una escala mayor a la estudiada, y así verificar las condiciones de diseño, operación y eficiencia del sistema.

Con la elaboración de dicha evaluación, se tendrían mayores herramientas para comprender y controlar las condiciones de aireación, recirculación de lodo y aumento del área de contacto del buchón de agua con el agua a tratar. Igualmente permitiría conocer factores importantes como lo es la incidencia de la lluvia y el viento sobre los canales en donde se encuentran las plantas acuáticas y el lodo sedimentado proveniente del tanque de aireación, ya que este podría no sedimentar y afectar la calidad del efluente.

## 6. CONCLUSIONES

- Es posible técnicamente convertir la totalidad del tratamiento terciario de la PTAR-UPB en un sistema de lodos activados, cumpliendo con la normatividad, sin embargo es necesario realizar un estudio económico y evaluar la viabilidad del sistema puesto es un sistema con alta demanda energética lo cual elevaría considerable los costos de operación.
- El sistema de lodos activados es capaz de soportar concentraciones de DQO altas, iguales a 788.16 mg/L. Alcanzando mejores remociones al funcionar con altas cargas, debido a que los microorganismos al obtener gran cantidad de alimento y energía logran degradar mayor material orgánica haciendo un tratamiento eficiente, capaz de mantener remociones hasta el 94% siempre y cuando las condiciones ambientales y operativas del sistema se garanticen.
- Un sistema de tratamiento biológico aerobio, como los lodos activados, si se ha hecho inoculación con un lodo proveniente de otra PTAR con características similares no requiere arranque. Este ocasiona que el sistema sea subalimentado la actividad metabólica de los microorganismos, y consecuentemente remoción baja y pérdida de biomasa en el tanque de aireación. Para estos sistemas se debe iniciar en su máxima capacidad de diseño o en las condiciones operacionales en las que se encontraba en la PTAR anterior.
- El sistema de lodos activados es vulnerable a fallas en la aireación y alimentación, siendo estas condiciones fundamentales para su buen desempeño y resultados óptimos, sin embargo, al no estar expuesto por largos periodos de tiempo, logra una recuperación y estabilización rápida del proceso. En éste estudio se observó que el sistema de lodos activados, puede soportar aproximadamente un día con estas fallas, estabilizándose sin necesidad de re inocular.
- Aunque el sistema de aireación con el que se contó, no fue el más óptimo, causando pérdida involuntaria de biomasa por los laterales del tanque de aireación, el proceso de lodos activados logró remociones del 90%, cumpliendo con las exigencias del proyecto norma de valores máximos permisibles del MAVDT, para el parámetro de DQO.
- Las condiciones de operación más adecuadas para un sistema de lodos activados, aplicado para el tratamiento de las aguas residuales de la UPB, corresponden a un tiempo de retención hidráulico igual a 6 horas y un tiempo de retención celular aproximado 9 días.

- La inclusión del buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), en el sedimentador del sistema de lodos activados, no logró incrementar las remociones de nitrógeno obtenidas en el tratamiento sin el uso de esta planta, incumpliendo aún el proyecto de norma propuesto por el MAVDT. El área de contacto entre el sistema radicular y el agua a tratar, limitó el desarrollo de las plantas y la absorción eficiente del nutriente.
- La remoción del fósforo se ve favorecida al implementar el buchón de agua en el sedimentador del sistema de lodos activados; realizando una permanente cosecha de plantas adultas se logra una remoción del 67.7%.
- El sistema de lodos activados-sedimentador, resulta ser una alternativa con buenas remociones en material orgánico, capaz de actuar como único tratamiento de las aguas residuales generadas por la UPB, es posible técnica y espacialmente su implementación, logrando remociones superiores al 90%, cumpliendo el decreto 1594 de 1984 y el proyecto de norma propuesto por MAVDT. Sin embargo, a la escala estudiada, no es un sistema que mejore las remociones en nitrógeno y fósforo, manteniendo un efluente con concentraciones promedio de 35.35 y 15 mg/L, respectivamente, incumpliendo con la normatividad.
- Las dimensiones del sistema de lodos activados–sedimentador, en el actual sistema terciario de la PTAR-UPB, comprenderían 61.59 m de longitud, para el tanque de aireación, donde se ubicaría un sistema de aireación y conducción para los 66.36 m restantes, espacio destinado para el sedimentador con el buchón de agua, allí se tendrían un área aproximada de contacto entre el sistema radicular de las plantas y el agua a tratar de 60 m<sup>2</sup>, lo que posibilitaría un aumento en la remociones de nutrientes, gracias a una mayor área absorción y espacio para el desarrollo del buchón de agua.

## 7. RECOMENDACIONES

- Contar con un sistema de energía complementario al principal de la UPB, el cual asegure la continuidad en la aireación y el suministro de agua residual en el sistema de tratamiento.
- Reevaluar el sistema de lodos activados-sedimentador en una sexta parte del tratamiento terciario de la PTAR-UPB, con el fin de estudiar una escala que permita el manejo y control de las dificultades presentadas y así verificar las condiciones de diseño, operación y eficiencia del sistema.
- Realizar un estudio sobre el tiempo de arranque para el sistema de lodos activados, bajo las características del afluente de la PTAR-UPB. Considerando el arranque, como el periodo en el que se genera un lodo maduro en el tanque de aireación, sin necesidad de hacer una inoculación con lodo externo. Es decir, determinar el tiempo en el que el sistema de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales de la UPB, arranca por sí sólo logrando remociones de material orgánico.
- En el momento de ser implementado a escala real, se deben desarrollar capacitaciones a los operarios sobre el principio de funcionamiento y operación del proceso de lodos activados, así mismo como el seguimiento para su evaluación.
- Evaluar el comportamiento del buchón de agua (*Eichhornia crassipes*), al aumentar área y tiempo de retención hidráulico; logrando establecer una relación entre consumo de nutrientes y área de contacto, permitiendo conocer la eficiencia que tiene el sistema de lodos activados al incluir el buchón de agua en el sedimentador.
- Dividir el sedimentador del sistema en dos segmentos, con el fin de disipar los efectos negativos del lodo concentrado sobre las raíces de las plantas acuáticas y conocer el grado de afectación en cuanto a remociones de N y P. Esta división permitirá la realización de evaluaciones intermedias, entre el tanque de aireación y el sedimentador; con el propósito de conocer la eficiencia que tiene cada una de las etapas del sistema, tanto del reactor de lodos activados como las obtenidas únicamente por el sedimentador con el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*).
- Evaluar la influencia de las condiciones climáticas sobre el sistema de lodos activados-sedimentador, para así, conocer el comportamiento hidráulico del sistema en eventos particulares de lluvia, vientos entre otros, que permitan plantear medidas de contingencia, previniendo el lavado del lodo y la desestabilización del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- APHA, AWWA, & WEF. (2005). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (21th ed.). Washington D.C.
- BLANCO, E. (n.d.). *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del agua*. Retrieved Julio 2011, from CIDTA: <http://www.cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/macrofitas.PDF>
- CAJIGAS, Á. A., TORRES, P., RODRIGUEZ, J., & RUEDA SAA, G. (2001). *Guía de Laboratorio. Ensayos de Sedimentabilidad de lodos*. Universidad del Valle , Cali.
- CAMACHO P, J., & ORDOÑEZ N, L. (2008). *Evaluación de la eficiencia de un sistema de recuperación de aguas residuales con Eichhornia crassipes, para el postratamiento del efluente del reactor anaerobio a flujo piston de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga*. Bucaramanga.
- CAMARGO, J. A., & ALONSO, A. (2007, Mayo ). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente* , 16(2), 98-110.
- CARLINI, M., & WALZ, D. (2003). *Problemas operacionales en plantas de tratamiento de*. Pontificia Universidad Católica de Argentina.
- CARPENTER, P. L. (1979). *Microbiología*. México D.F.: Nueva Editorial Interamericana.
- CARPES, G. (2009, Diciembre). Modelado de procesos biológicos en las EDAR. *Tecnología del Agua*(Núm. 315), 22-33.
- CELIS HIDALGO, J., JUNOD MONTANO, J., & SANDOVAL ESTRADA, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *THEORIA. Ciencia, Arte y Humanidades*, 17-25.
- COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. (1997). *Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental e-seia*. Retrieved April 13, 2011, from [http://www.e-seia.cl/archivos/Programa\\_Control\\_Parametros\\_Criticos.doc](http://www.e-seia.cl/archivos/Programa_Control_Parametros_Criticos.doc)

- CRITES, R., & TCHOBANOGLIOUS, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. (Vol. II). (E. A. H, Ed.) Santafé de Bogotá: McGraw Hill.
- CRITES, R., & TCHOBANOGLIOUS, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw Hill Interamericana, S.A.
- DAVIS, M. L., & MASTEN, S. J. (2005). *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. México: McGraw Hill - Interamericana de Editores, S.A. de C.V.
- DELGADILLO, O., CAMACHO, A., PÉREZ, L., & ANDRADE, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. (N. A. Durán, Ed.) Cochamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- DI MARZIO, W. D. (2004, Septiembre/Octubre). Microbiología de lodos activados: una herramienta retrospectiva y predictiva de la depuración de efluentes. *Agua Latinoamerica*, 16-17.
- FINAMORE, C., BLANCO, H., & LÓPEZ, E. (1999). Constantes cinéticas en un sistema de lodos activados a escala laboratorio. *Memorias de: XXVII Congreso Inteeramericano de Engenharia Sanitária e Ambiental* (pp. 1-7). ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- G.E.I.A., G. (1948). *Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Bahía Blanc*. Retrieved Julio 2011, from [http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/efluentes/tema\\_9.pdf](http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/efluentes/tema_9.pdf)
- GAMARRA H, Y., FORERO S, J., QUINTERO H, O., RUEDA V, F., & AGUILAR A, F. (2005). Evaluación de un modelo piloto integrado para el postratamiento del efluente del RAP con Spirodela sp. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 5-15.
- GERARDO, K. (1999). *ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. (Vol. II). Madrid: McGraw Hill / Interamericana de España, S.A. U.
- GLYNN, H. J., & GARY M, H. (n.d.). *Ingeniería ambiental* (2da ed.). Pearson Prentice Hall.
- GÓMEZ GÓMEZ, E., LEBRATO MARTINEZ, J., BERMÚDEZ SANCHEZ, M., & SALGUERO VILLADIEGO, J. (1999, Marzo). Bioindicación como herramienta en el control de estaciones depuradoras de aguas residuales. Su aplicación en el arranque de la EDAR Guadalquivir (Sevilla). *Tecnología del Agua*(No. 186), 21-31.

- GONZÁLEZ DÍAZ, O., HERNÁNDEZ MARRERO, J., RODRÍGUEZ PASTOR, M., & PRATS RICO, D. (2000, Agosto). Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Tecnología del agua*(Núm. 203), 42- 49.
- INFOJARDÍN. (n.d.). Retrieved Junio 20, 2011, from Jacinto de agua, Camalote, Camalotes, Lampazo, Violeta de agua, Buchón, Taruya.: <http://fichas.infojardin.com/acuaticas/eichhornia-crassipes-jacinto-de-agua-camalote-camalotes.htm>
- MARTIN M, I. (1989). Depuración de agua con plantas emergentes. *Hojas Divulgadoras*(Num. 16).
- MAVDT, M. d. (2010). *Grupo Asesor Ambiental y Civil LTDA*. Retrieved Agosto 2011, from GRUPAAC LTDA: <http://www.grupaac.com/proyecto-de-resolucion-del-mavdt-vertimientos>
- METCALF & EDDY, INC. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. (Vols. I - II). México D.F.: McGraw-Hill. Interamericana Editores.
- MIRA, J. (2007, Julio). *ECOPORTAL*. Retrieved Septiembre 2011, from [http://www.ecoportel.net/Temas\\_Especiales/Agua/El\\_agua\\_en\\_Colombia](http://www.ecoportel.net/Temas_Especiales/Agua/El_agua_en_Colombia)
- OROZCO JARAMILLO, A. (2005). *Bioningeniería en aguas residuales. Teoría y Diseño*. Bogotá, Colombia: ACODAL.
- OSORIO DUARTE, M. (2010). *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.
- PTAR UPB. (2007). *Seguimiento operacional Planta de Tratamiento UPB*. Bucaramanga.
- RAINFOREST. (n.d.). *La depuración de las Aguas Residuales en EDAR*. Retrieved Junio 2011, from <http://www.starbacks.ca/RainForest/Canopy/1285/indicado.html>
- RAMALHO, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- RODRÍGUEZ PÉREZ, C. (2008). OBTENCIÓN DE PARÁMETROS CINÉTICOS EN SISTEMAS ACUÁTICOS CON JACINTO DE AGUA. *XXIV Congreso de la Asociación Iberoamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, (p. 13). La Habana.

- RODRÍGUEZ PÉREZ, C., DIAZ MARRENO, M., GUERRA DIAZ, L., & HERNANDEZ de ARMAS, J. M. (n.d.). *ACCIÓN DEPURADORA DE ALGUNAS PLANTAS ACUÁTICAS SOBRE LAS AGUAS RESIDUALES*. Retrieved Agosto 2011, from [www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01280e08.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01280e08.pdf)
- ROMERO ROJAS, J. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingenierías.
- ROMERO ROJAS, J. A. (1996). *Acuiquímica*. Santafé de Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- SAWYER, C. N., McCARTY, P. L., & PARKIN, G. F. (2001). *Química par Ingeniería Ambiental* (2da ed.). Bogotá: McGraw-Hill.
- SPERILING, M. V., & LEMOS CHERNICHARO, C. A. (2005). *Biological wastewater Treatment in warm climate Regions* (Vol. Two). London: IWA Publishing.
- UNAVARRA. (2008, Diciembre 19). *Universidad Publica de Navarra*. Retrieved Septiembre 9, 2011, from <http://www.unavarra.es/genmic/microgral/Tema%2002.-%20Cultivo%20de%20microorganismos.pdf>
- VILASECA V. , M. (2001). OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DE FANGOS ACTIVADOS EN LOS TRATAMIENTOS DE DEPURACIÓN BIOLÓGICA. *Boletín Interxter (U.P.C)*(No. 119), 67-72.
- WINKLER, M. A. (1993). *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. México D.F.: Limusa S.A - Grupo Noriega Editores.

## ANEXOS

### Anexo 1. Caracterización planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.



ACREDITADO ISO 17025 RESOLUCION 0184 DE 2005

LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO DE AGUAS RESIDUALES	F-5.10-01
REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO	Página 1 de 2

DESCRIPCION DE LA MUESTRA

CLIENTE: PTAR UPB	CLIENTE: PTAR UPB
CODIGO: 52	CODIGO: 53
FUENTE: MUESTRA 1	FUENTE: MUESTRA 2
FECHA DE RECEPCION: 09-03-11	FECHA DE RECEPCION: 09-03-11
FECHA DE REPORTE: 14-07 -11	FECHA DE REPORTE: 14-07-11

VARIABLE	UNIDADES	PARAMETRO		Incertidumbre	METODO
		52	53		
DQO	mg O <sub>2</sub> / L	907	733	2.7	SM 5220-B
DQO FILTRADA	mg O <sub>2</sub> / L	141	191	2.7	SM 5220-B
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> / L	386	195	6.1	SM 5210-B-SM4500OC
DBO <sub>5</sub> FILTRADA	mg O <sub>2</sub> / L	61.7	53.8	6.1	SM 5210-B-SM4500OC
Sólidos suspendidos totales	mg Sólidos susp /L	90.8	125	16	SM 2540-D
Sólidos suspendidos totales volátiles	mg Sólidos suspvol /L	80.0	102	16	SM 2540-D
Sólidos totales	mg Sólidos tot /L	910	854	16	SM 2540-B
Sólidos totales volátiles	mg Sólidos tot vol /L	300	290	16	SM 2540-B
Sólidos disueltos	mg Sólidos dis /L	819	729	16	SM 2540-C
Sólidos disueltos volátiles	mg Sólidos dis vol /L	220	188	16	SM 2540-C
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	832	782	---	SM 2320-B
Alcalinidad bicarbonacea	mg CaCO <sub>3</sub> /L	832	782	---	SM 2320-B

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno DQO: Demanda Química de Oxígeno

EL MONITOREO FUE REALIZADO POR EL CLIENTE

**Qca. Esp. Ing. Ambiental CLAUDIA SOFIA QUINTERO DUQUE**  
 Coordinadora Laboratorio de Aguas Residuales

"Los resultados reportados corresponden unicamente a las muestras analizadas "  
 " El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Aguas Residuales".

SEDE MEDELLÍN Campus de Laureles Circular 1a No. 70-01 / Teléfono: (057) (4) 4159015 / Fax: (057) (4) 2502080 / E-mail: comrelp@upb.edu.co  
**SECCIONAL BUCARAMANGA** Autopista Piedecuesta Km. 7 / Teléfono: (057) (7) 6796220 / Fax: (057) (7) 6796221 / E-mail: comunicaciones.bga@upb.edu.co  
 SECCIONAL MONTERÍA Km. 8 vía a Cereté / Teléfono: (057) (4) 7860146 / Fax: (057) (4) 7860912 / E-mail: creimter@upomonteria.edu.co  
 SECCIONAL PALMIRA Seminario Cristo Sacerdote, Km. 1 - Vía Tienda Nueva / Teléfonos: (057) (2) 2702545 / Fax: (057) (2) 2723121 / E-mail: upcpalmira@upb.edu.co  
[www.upb.edu.co](http://www.upb.edu.co) / Colombia - Suramérica

LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO DE AGUAS RESIDUALES	F-5.10-01
REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO	Página 2 de 2

DESCRIPCION DE LA MUESTRA

CLIENTE: PTAR UPB	CLIENTE: PTAR UPB
CODIGO: 54	CODIGO: 55
FUENTE: MUESTRA 3	FUENTE: MUESTRA 4
FECHA DE RECEPCION: 09-03-11	FECHA DE RECEPCION: 09-03-11
FECHA DE REPORTE: 14-07-11	FECHA DE REPORTE: 14-07-11

VARIABLE	UNIDADES	PARAMETRO		Incertidumbre	METODO
		54	55		
DQO	mg O <sub>2</sub> / L	1285	933	2.7	SM 5220-B
DQO FILTRADA	mg O <sub>2</sub> / L	406	132	2.7	SM 5220-B
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> / L	927	410	6.1	SM 5210-B-SM4500OC
DBO <sub>5</sub> FILTRADA	mg O <sub>2</sub> / L	168	48.7	6.1	SM 5210-B-SM4500OC
Sólidos suspendidos totales	mg Sólidos susp /L	774	141	16	SM 2540-D
Sólidos suspendidos totales volátiles	mg Sólidos suspvol /L	702	104	16	SM 2540-D
Sólidos totales	mg Sólidos tot /L	1464	798	16	SM 2540-B
Sólidos totales volátiles	mg Sólidos tot vol /L	936	278	16	SM 2540-B
Sólidos disueltos	mg Sólidos dis /L	690	657	16	SM 2540-C
Sólidos disueltos volátiles	mg Sólidos dis vol /L	234	174	16	SM 2540-C
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	485	675	---	SM 2320-B
Alcalinidad bicarbonacea	mg CaCO <sub>3</sub> /L	485	675	---	SM 2320-B

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno DQO: Demanda Química de Oxígeno

EL MONITOREO FUE REALIZADO POR EL CLIENTE

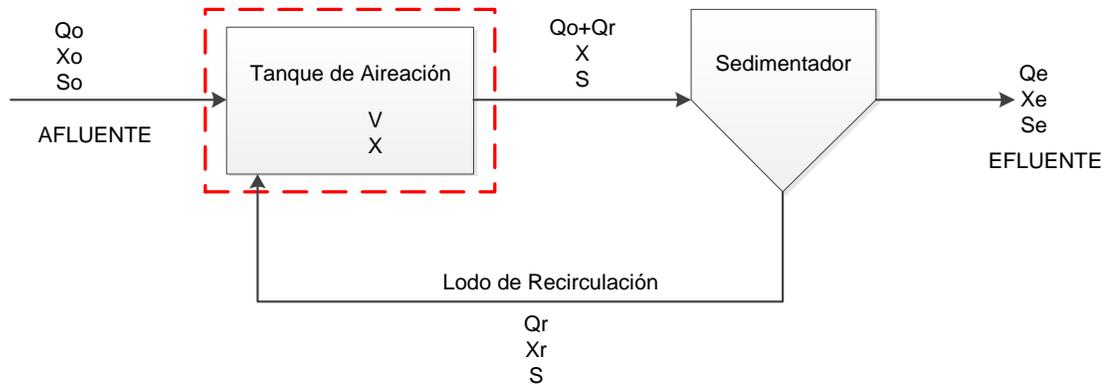


Qca. Esp. Ing. Ambiental **CLAUDIA SOFIA QUINTERO DUQUE**  
Coordinadora Laboratorio de Aguas Residuales

“Los resultados reportados corresponden unicamente a las muestras analizadas “  
“ El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Aguas Residuales”.

**Anexo 2.** Ecuaciones para el diseño de un proceso de lodos activados.

Recopilación de ecuaciones para el diseño de un reactor de lodos activados y planteamiento del diseño. Gerardo, 1999; Orozco Jaramillo, 2005; Romero Rojas J. , 1999; Finamore , Blanco, & López, 1999.



$$Q_o = Q_e + Q_w$$

**Balance de masa de BIOMASA: (X)**

Entrada = Salida + Producción de biomasa

$$Q_o S_o + Q_r X_r = (Q_o + Q_r) X + r' g V$$

$$r' g = \frac{Q_r X_r - Q_o X - Q_r X}{V}$$

**Balance de masa del SUSTRATO: (S)**

Entrada = Salida + Consumo de sustrato

$$Q_o S_o + Q_r S = (Q_o + Q_r) S - r S V$$

$$r S = \frac{Q_o S - Q_o S_o}{V}$$

### Ecuaciones generales:

$$\text{Masa} = [ ] \times V$$

$$Q = \frac{V}{T.R.H}$$

$$\text{Densidad} = \rho = \frac{m}{Vol}$$

$$S_o = DBO_o - (0.63) \times (S_{T_o}) \times (SST/S_{T_o})$$

$$S = S_e = DBO_e - (0.63) \times (S_{T_e}) \times (SST/S_{T_e})$$

$$\frac{A}{M} = \frac{Q_o S_o}{V X}$$

$$CO = Q_o S_o$$

$$COV = \frac{Q_o S_o}{V}$$

$$\phi_c = \frac{XV}{Q_e X_e} \quad (Q_e = Q_o)$$

$$P_x = \frac{XV}{\phi_c}$$

$$\% \text{ Remoción} = \frac{\text{Valor Afluyente} - \text{Valor Efluyente}}{\text{Valor Afluyente}} \times 100$$

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d \cdot \theta_c}$$

$$Q_w = \frac{P_x}{X_r}$$

$$Q_r = \frac{Q \cdot X}{X_r - X}$$

**Anexo 3.** Características de operación del sistema de lodos activados-sedimentador.

Días	AF	T.R.H (días)	Qo (m <sup>3</sup> /día)	Qr (m <sup>3</sup> /día)	Xr (mg/L)	Xw (mg/L)
1 – 3	EF. RAP	1.00	<b>0.130</b>	<b>0.039</b>	14415	1655
3 – 5	EF. RAP	0.83	<b>0.156</b>	<b>0.047</b>	14415	1655
5 – 9	EF. RAP	0.63	<b>0.209</b>	<b>0.209</b>	14415	1655
12 – 31	EF. RAP	0.33	<b>0.391</b>	<b>0.117</b>	14415	1655
31 - 94	EF. RAP	0.25	<b>0.521</b>	<b>0.261</b>	14415	1655

**Anexo 4.** Resultados obtenidos de pH y alcalinidad fase 1.

Día	T.R.H (H)	pH		ALCALINIDAD	
		AF	EF	AF	EF
5	15	7.51	7.81		
9	15	7.91	7.93		
19	8	7.85	6.05	638	42
22	8	7.14	6.69	670	232
23	8	7.48	6.9	600	174
24	8	7.38	6.59	466	123
25	8	7.37	7.12	717	203
26	8	7.64	7.44	754	279
29	8	6.88	6.62	440	101.9
30	6	7.26	6.91	542	124.2
31	6	7.26	7.14	585	222
32	6	7.28	7.29	618	170
33	6	7.15	7.24	653	357
36	6	7.42	7.19	522	161
37	6	7.39	7.58	559	352
38	6	7.32	7.62	526	377
39	6	7.42	7.64	517	385
40	6	6.99	7.43	422	316
41	6	6.86	6.6	446	123
44	6	6.78	6.52	184	89
57	6	7.9	6.87	381	76
58	6	8.54	6.75	933	60
59	6	8.64	7.25	845	205
60	6	7.11	6.98	358	97.2
61	6	8.56	7.09	569	134
65	6	8.38	7.91	392	292
67	6	8.81	7.48	460	329
68	6	8.84	7.85	746	347

**Anexo 5.** Valores de DQO y DBO fase 1 y 2.

Día	DQO (mg/L)			DBO (mg/L)		
	AF	EF	% R	AF	EF	% R
1	264.0	121.0	54.18%	132.0	60.5	54.18%
3	347.8	211.5	39.19%	173.9	105.8	39.19%
5	224.2	212.3	5.28%	112.1	106.2	5.28%
9	323.2	218.7	32.33%	161.6	109.4	32.33%
12	462.1	137.9	70.15%	231.0	69.0	70.15%
17	422.4	173.4	58.94%	211.2	86.7	58.94%
19	252.2	75.5	70.05%	126.1	37.8	70.05%
22	152.3	130.6	14.29%	76.2	65.3	14.29%
24	190.1	174.4	8.23%	77.1	11.6	84.91%
26	323.8	229.4	29.15%	102.0	64.0	37.32%
29	107.2	323.5	-201.79%	53.6	161.8	-201.79%
31	173.8	126.1	27.44%	86.9	63.0	27.44%
33	289.9	148.5	48.79%	145.0	74.2	48.79%
38	512.0	96.0	81.25%	256.0	48.0	81.25%
40	224.0	112.0	50.00%	112.0	56.0	50.00%
41	216.0	200.0	7.41%	108.0	100.0	7.41%
57	388.8	24.6	93.66%	240.2	4.4	98.15%
59	806.4	100.5	87.54%	403.2	50.2	87.54%
61	905.6	218.2	75.91%	73.0	9.9	86.43%
66	796.8	87.0	89.08%	398.4	43.5	89.08%
68	1043.2	69.1	93.38%	453.4	10.2	97.75%
75*	1371.2	202.2	85.25%	685.6	101.1	85.25%
78	1201.4	125.4	89.56%	600.7	62.7	89.56%
80	876.8	105.0	88.03%	438.4	52.5	88.03%
81	929.6	120.3	87.06%	464.8	60.2	87.06%
82	873.8	142.1	83.74%	188.0	9.9	94.75%
86	1144.0	111.4	90.27%	572.0	55.7	90.27%
87	1062.4	74.2	93.01%	382.1	11.0	97.11%
88	910.4	90.9	90.02%	455.2	45.4	90.02%
89	1115.2	92.8	91.68%	631.4	11.2	98.23%
94	1064.0	137.4	87.08%	532.0	68.7	87.08%

\*Inicio Fase 2.

**Anexo 6.** Valores de IVL y relación A/M de la fase 1 y 2.

Día	A/M	I.V.L
	mgDBO/mgSTV*d	mL/g
26	0.02	61.45
57	0.29	89.02
61	-0.04	68.43
68	0.83	12.13
75 *	0.49	68.69
78	1.19	143.86
80	0.35	128.61
82	0.06	87.09
87	0.28	57.06
89	0.57	111.42
94	0.11	134.05

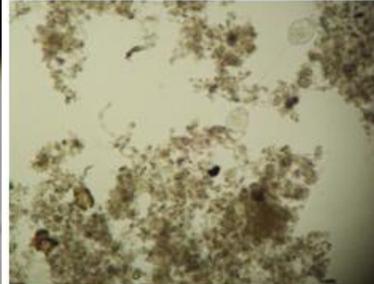
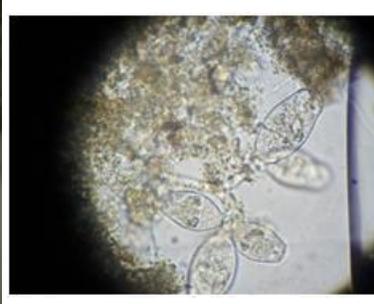
\*Inicio fase 2

## Anexo 7. Seguimiento Microbiológico.

### 1. RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA 1.

<b>ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	Licor mixto proveniente del tanque de aireación de un sistema de lodos activados.
<b>TIPO DE MUESTREO</b>	Puntual
<b>FECHA TOMA MUESTRA</b>	15 de julio de 2011
<b>FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA</b>	15 de julio de 2011
<b>TIPO DE ANÁLISIS</b>	Observación directa. Análisis cualitativo.
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	
<b>GRUPO TAXONÓMICO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>
Género Uronema.	Ciliado móvil, de tamaño pequeño, con presencia de cilios diferenciados de mayor longitud (cirros). Perteneciente al grupo de los oligohimenóforos. Población predominante en la muestra observada.
Género Vorticella sp.	Ciliado del grupo de los oligohimenóforos peritricos sésiles y pedunculados. Se observaron especies con pedúnculo contráctil y especies con pedúnculo no contráctil. Se alimentan de bacterias (Bacteriófagos). Población abundante en la muestra analizada y se observaron especies diferentes de este género.
Clase Flagelada	Se observó abundancia de un tipo de flagelado redondeado de tamaño pequeño incoloro. Son organismos heterótrofos estrictos y se alimentan de bacterias (Bacteriófagos).
Género Opercularia sp.	Ciliado colonial sésil unido al sustrato con pedúnculo no contráctil. Perteneciente al grupo de los oligohimenóforos peritricos. Población relativamente abundante en la muestra analizada.
Clase Rotífera.	Metazoo, heterótrofo microscópico, perteneciente al reino animal. Organismos poco abundantes en la muestra analizada.
Género Linotus	Ciliados móviles o nadadores libres, carnívoros que se alimentan de algas u otros ciliados. Pertenecen al grupo de los ciliados litostomados pleurostomátidos. Se caracteriza por ser uno de los primeros organismos que se presentan al arrancar un sistema en buenas condiciones de oxigenación. En la muestra analizada no es el género predominante pero se observó una abundancia significativa de individuos.

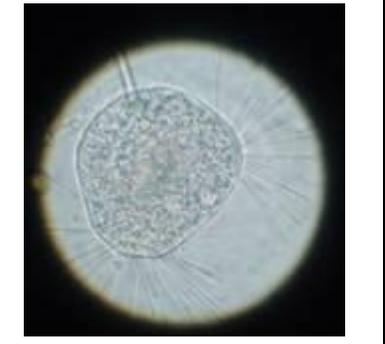
REGISTRO FOTOGRÁFICO MUESTRA 1.

<p><b>Género Uronema sp.</b> Objetivo 100 x</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 X</p>
		
<p><b>Género Vorticella sp. con pedúnculo contráctil.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>
		
<p><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 100 X</p>	<p><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 40 X</p>
		
<p><b>Ciliado nadador.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Flagelado.</b> Objetivo 100 X</p>	<p><b>Clase Rotífera.</b> Objetivo 40 X</p>
		

## 2. RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRA 2.

<b>ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	Licor mixto proveniente del tanque de aireación de un sistema de lodos activados.
<b>TIPO DE MUESTREO</b>	Puntual
<b>FECHA TOMA MUESTRA</b>	18 de julio de 2011
<b>FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA</b>	18 de julio de 2011
<b>TIPO DE ANÁLISIS</b>	Observación directa. Análisis cualitativo.
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	
<b>GRUPO TAXONÓMICO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>
Clase Flagelada	Microorganismo predominante en la muestra analizada. Flagelado redondeado, incoloro y de tamaño pequeño. Son organismos heterótrofos estrictos y se alimentan de bacterias (Bacteriófagos). Se observó poco movimiento.
Género Vorticella sp.	Ciliado del grupo de los oligohimenóforos peritricos sésiles y pedunculados. Se observaron especies con pedúnculo no contráctil. Se observó poca abundancia de individuos de este género.
Género Opercularia sp.	Ciliado colonial sésil unido al sustrato con pedúnculo no contráctil. Perteneciente al grupo de los oligohimenóforos peritricos. Población poco abundante en la muestra analizada.
Clase Rotífera.	Metazoo, heterótrofo microscópico, perteneciente al reino animal. Organismos poco abundantes en la muestra analizada y en la mayoría no se evidenció movimiento.
Género Linotus	Ciliados móviles o nadadores libres, carnívoros que se alimenta de algas u otros ciliados. Pertenecen al grupo de los ciliados litostomados pleurostomátidos. En la muestra analizada no es el género predominante pero se observó individuos con movimiento.
Género Podhophyra	Ciliado del grupo de los filofaríngeos suctores sésiles. Son carnívoros por alimentarse de otros ciliados libres. Presenta el cuerpo esférico y presenta cilios a manera de tentáculos en la parte anterior.
Género Tokophyra	Ciliado del grupo de los filofaríngeos suctores sésiles. Son carnívoros por alimentarse de ciliados libres. Cuerpo piriforme o cónico, tentáculos en la parte anterior agrupados.

REGISTRO FOTOGRÁFICO MUESTRA 2.

<p><b>Género Linotus sp.</b> Objetivo 40 x.</p>	<p><b>Género Podophyra.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Tokophyra sp.</b> Objetivo 40 X</p>
		
<p><b>Género Tokophyra sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Tokophyra sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Tokophyra sp.</b> Objetivo 40 X</p>
		
<p><b>Flagelado.</b> Objetivo 100 X</p>	<p><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>
		

**Género Vorticella sp.**

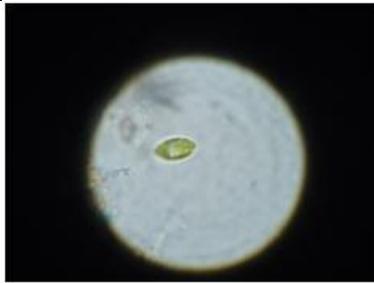
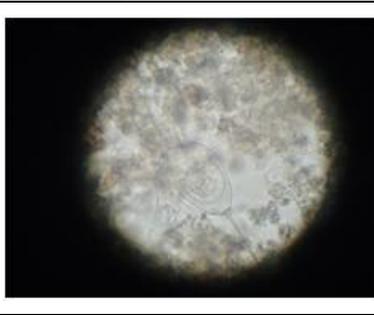
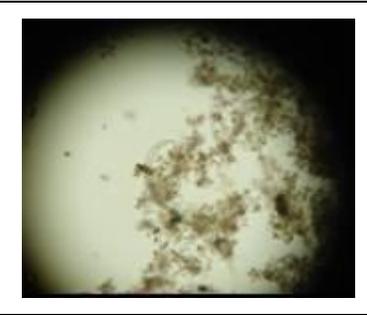
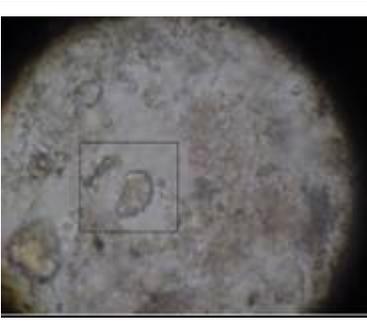
Objetivo 40 x



### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS MUESTRA 3.

<b>ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	Licor mixto proveniente del tanque de aireación de un sistema de lodos activados.
<b>TIPO DE MUESTREO</b>	Puntual
<b>FECHA TOMA MUESTRA</b>	22 de julio de 2011
<b>FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA</b>	22 de julio de 2011
<b>TIPO DE ANÁLISIS</b>	Observación directa. Análisis cualitativo.
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	
<b>GRUPO TAXONÓMICO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>
Género Vorticella sp.	Ciliado del grupo de los oligohimenóforos peritricos sésiles y pedunculados. Se observaron especies con pedúnculo no contráctil. Se observó poca abundancia de individuos de este género.
Género Opercularia sp.	Ciliado colonial sésil unido al sustrato con pedúnculo no contráctil. Perteneció al grupo de los oligohimenóforos peritricos. Población poco abundante en la muestra analizada.
Clase Rotífera.	Metazoo, heterótrofo microscópico, perteneciente al reino animal. Organismos poco abundantes en la muestra analizada y en la mayoría no se evidenció movimiento.
Género Tokophyra	Ciliado del grupo de los filofaríngeos suctores sésiles. Son carnívoros por alimentarse de ciliados libres. Cuerpo piriforme o cónico, tentáculos en la parte anterior agrupados.
Clase Nemátoda	Gusano microscópico de cuerpo cilíndrico y con terminaciones aguzadas. Se alimentan de protozoarios.
Género Euglena	Organismo unicelular flagelado fotosintético. Organismo significativo en la muestra observada.
Género Euplotes	Protozoo ciliado reptante, clasificado en el grupo de los espirotrícos hipotrícos. Presenta cilios modificados para la locomoción sobre sustratos denominados cirros. Se alimenta de bacterias floculantes.

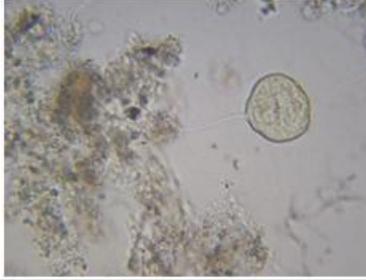
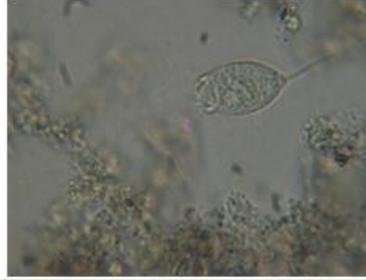
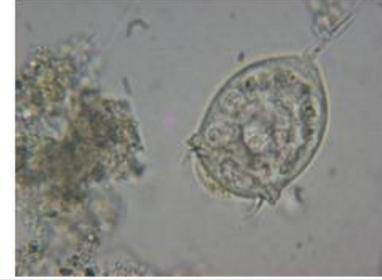
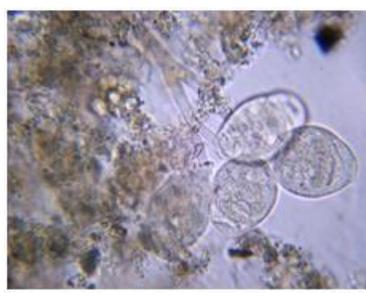
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA MUESTRA 3.

<p><b>Género Euglena sp.</b> Objetivo 40 x.</p>	<p><b>Género Tokophyra.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Tokophyra sp.</b> Objetivo 40 X</p>
		
<p><b>Género Tokophyra sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>
		
<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 100 X</p>	<p><b>Clase Nematoda.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Clase Rotífera.</b> Objetivo 40 X</p>
		
<p><b>Género Euplotes sp.</b> Objetivo 40X</p>		
		

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS MUESTRA 4.

<b>ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	Licor mixto proveniente del tanque de aireación de un sistema de lodos activados.
<b>TIPO DE MUESTREO</b>	Puntual
<b>FECHA TOMA MUESTRA</b>	29 de julio de 2011
<b>FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA</b>	29 de julio de 2011
<b>TIPO DE ANÁLISIS</b>	Observación directa. Análisis cualitativo.
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	
<b>GRUPO TAXONÓMICO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>
Género Vorticella sp.	Ciliado del grupo de los oligohimenóforos peritricos sésiles y pedunculados. Se observaron especies con pedúnculo no contráctil y contráctil. Organismos predominantes en la muestra analizada. Se observaron individuos en proceso de reproducción asexual por conjugación.
Género Opercularia sp.	Ciliado colonial sésil unido al sustrato con pedúnculo no contráctil. Pertenece al grupo de los oligohimenóforos peritricos. Población poco abundante en la muestra analizada.
Clase Rotífera	Ciliado del grupo de los filofaríngeos suctores sésiles. Son carnívoros por alimentarse de ciliados libres. Cuerpo piriforme o cónico, cilios en la parte anterior agrupados cuyo movimiento permite la captura del alimento

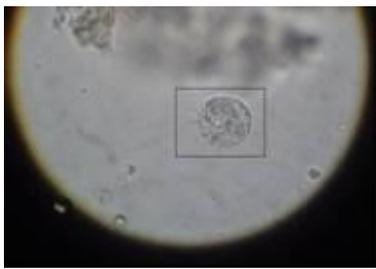
REGISTRO FOTOGRÁFICO MUESTRA 4.

<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Vorticella sp. en conjugación</b> Objetivo 40 x</p>
		
<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>
		
<p><b>Género Vorticella sp. en conjugación</b> Objetivo 100 X</p>	<p><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Clase Rotífera.</b> Objetivo 40 X</p>
		
<p><b>Clase Rotífera.</b> Objetivo 40 X</p>	<p><b>Clase Rotífera.</b> Objetivo 40 X</p>	
		

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS MUESTRA 5.

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	
<b>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	Licor mixto proveniente del tanque de aireación de un sistema de lodos activados.
<b>TIPO DE MUESTREO</b>	Puntual
<b>FECHA TOMA MUESTRA</b>	01 de Agosto de 2011
<b>FECHA ANÁLISIS DE LA MUESTRA</b>	01 de Agosto de 2011
<b>TIPO DE ANÁLISIS</b>	Observación directa. Análisis cualitativo.
RESULTADOS OBTENIDOS	
GRUPO TAXONÓMICO	CARACTERÍSTICAS GENERALES
Género Vorticella sp.	Ciliado del grupo de los oligohimenóforos peritricos sésiles y pedunculados. Se observaron especies con pedúnculo no contráctil y contráctil. Se observaron individuos en reproducción asexual por fisión o división binaria. Organismos predominantes en la muestra analizada.
Género Opercularia sp.	Ciliado colonial sésil unido al sustrato con pedúnculo no contráctil. Pertenece al grupo de los oligohimenóforos peritricos. Población poco abundante en la muestra analizada.
Clase Rotífera Género Philodina	Ciliado del grupo de los filofaríngeos suctores sésiles. Son carnívoros por alimentarse de ciliados libres. Cuerpo piriforme o cónico, cilios en la parte anterior agrupados cuyo movimiento permite la captura del alimento
Género Euplotes	Protozoo ciliado reptante, clasificado en el grupo de los espirotrícos hipotrícos. Presenta cilios modificados para la locomoción sobre sustratos denominados cirros Se alimenta de bacterias floculantes.

REGISTRO FOTOGRÁFICO MUESTRA 5.

<p><b>Género Vorticella sp.</b> en proceso de división binaria. Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Vorticella sp.</b> en conjugación Objetivo 40 x</p>
 Micrograph showing two Vorticella sp. organisms in the process of binary division. The organisms are oval-shaped with a central body and a long, thin stalk. The internal structure is visible, showing the contractile vacuole and the oral groove.	 Micrograph of a single Vorticella sp. organism. It is an oval-shaped ciliate with a long, thin stalk. The internal structure is visible, showing the contractile vacuole and the oral groove.	 Micrograph showing two Vorticella sp. organisms in the process of conjugation. The organisms are oval-shaped with a long, thin stalk. The internal structure is visible, showing the contractile vacuole and the oral groove.
<p><b>Género Opercularia sp.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Philodina sp.</b> Objetivo 40 x</p>	<p><b>Género Euplotes sp.</b> Objetivo 40 x</p>
 Micrograph showing a cluster of Opercularia sp. organisms. They are oval-shaped with a long, thin stalk. The internal structure is visible, showing the contractile vacuole and the oral groove.	 Micrograph of a single Philodina sp. organism. It is a long, cylindrical ciliate with a long, thin stalk. The internal structure is visible, showing the contractile vacuole and the oral groove.	 Micrograph showing a single Euplotes sp. organism. It is a small, oval-shaped ciliate with a long, thin stalk. The internal structure is visible, showing the contractile vacuole and the oral groove.

**Anexo 8. Resultados cálculos fase 1.**

Vol T.A	Qo	T.R.H	Qr	Xr
0.13035m <sup>3</sup>	0.5214 m <sup>3</sup> /día	6 horas	0.261 m <sup>3</sup> /día	14415 mg/L

Día	T.R.H (días)	Qo (m3/día)	Qr (m3/día)	Xr (mg/L)	REM	[X] T.A.	So	Se
					%	mg/L	mg/L	mg/L
26	0.33	0.391	0.391	14415	37.32%	3936.87	30.14	45.95
31	0.25	0.521	0.261	14415	27.44%	3336.24	13.55	54.25
57	0.25	0.521	0.261	14415	98.15%	2231.25	162.46	-12.05
59	0.25	0.521	0.261	14415	87.54%	2231.25	283.98	39.25
61	0.25	0.521	0.261	14415	86.43%	2629.25	-24.61	-9.36
68	0.25	0.521	0.261	14415	97.75%	1521.25	315.66	-2.69
75*	0.25	0.521	0.261	14415	85.25%	5606.25	685.60	84.93
78	0.25	0.521	0.261	14415	89.56%	1746.25	519.02	54.20
80	0.25	0.521	0.261	14415	88.03%	3614.55	319.19	40.65
82	0.25	0.521	0.261	14415	94.75%	4501.25	63.17	-3.84
87	0.25	0.521	0.521	14415	97.11%	3249.10	224.89	0.04
89	0.25	0.521	0.521	14415	98.23%	3502.50	495.71	-0.93
94	0.25	0.521	3.128	14415	87.08%	15795.00	447.64	55.75

\*Inicio fase 2

Día	A/M	CO	COV	r'g	rS	°c	Px	Px
	mgDBO/mgSTV*d	mg/día	mg/L*día	(mg/ L*día)	(mg/ L*día)	(días)	mg/día	kg/día
26	0.02	11.79	90.43	19623.81	47.42	4.48	114577.65	114.58
31	0.02	7.07	54.22	8812.56	162.79	5.56	78210.00	78.21
57	0.29	84.71	649.84	15442.50	-698.03	1.37	211688.40	211.69
59	0.51	148.07	1135.92	15442.50	-978.93	3.62	80295.60	80.30
61	-0.04	-12.83	-98.45	13054.50	61.00	1.65	207517.20	207.52
68	0.83	164.59	1262.65	19702.50	-1273.41	4.32	45883.20	45.88
75*	0.49	357.47	2742.40	-4807.50	-2402.69	6.61	110536.80	110.54
78	1.19	270.62	2076.08	18352.50	-1859.27	2.91	78210.00	78.21
80	0.35	166.42	1276.74	7142.70	-1114.16	9.61	49011.60	49.01
82	0.06	32.94	252.69	1822.50	-268.05	6.12	95937.60	95.94
87	0.28	117.26	899.57	31667.20	-899.41	4.14	102194.40	102.19
89	0.57	258.46	1982.84	29640.00	-1986.57	9.73	46926.00	46.93
94	0.11	233.40	1790.56	-96300.00	-1567.57	16.05	128264.40	128.26

\*Inicio fase 2

ESTADÍSTICO	A/M	CO	COV	r'g	rS	°c	Px	Px
	mgDBO/ mgSTV*d	mg/día	mg/L*día	(mg/ L*día)	(mg/ L*día)	(días)	mg/día	kg/día
<b>PROME</b>	0.359683323	141.534825	1085.8061	6122.75154	-982.837134	5.86033566	103788.681	103.788681
<b>MEDIANA</b>	0.29124343	148.067466	1135.92226	15442.5	-978.93424	4.47879977	95937.6	95.9376
<b>DES. ESTÁNDAR</b>	0.358690716	115.8135	888.481016	32378.3071	831.547867	4.00428165	53754.4855	53.7544855

**Anexo 9.** Resultados obtenidos fase 2.

Día	T.R.H (H)	pH		ALCALINIDAD	
		AF	EF	AF	EF
75*	6	8.98	8.18	643	415
78	6	7.34	7.67	340	211
79	6	8.86	8.14	692	433
80	6	8.92	8.02	796	538
81	6	8.91	7.35	718	192
82	6	8.97	7.66	703	303
86	6	8.77	7.50	544	196
87	6	8.86	8.09	636	379
88	6	8.83	8.27	600	540
89	6	8.44	7.58	580	310

Día	ST (mg/L)				STV (mg/L)			
	AF	EF	LODO	% Rem	AF	EF	LODO	%Rem
75*		654	7570.0			212	4405.0	
78	792	344	2850.0	56.57%	512	150	545.0	70.70%
80	1156	478	3693.3	58.65%	536	94	2413.3	82.46%
82	1210	554	4880.0	54.21%	682	184	3300.0	73.02%
87	1524	444	1226.7	70.87%	934	196	846.6	79.01%
89	1316	490	1795.0	62.77%	724	90	1100.0	87.57%
94	818	524	1865.0	35.94%	422	246	1380.0	41.71%