

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA
INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO
PARA REMOCIÓN DE DQO DE AGUAS RESIDUALES DE
LA INDUSTRIA TEXTIL, UTILIZANDO EL INÓCULO
MICROBIANO NATIVO I5

PREVIA A LA OBTENCIÓN DE GRADO ACADÉMICO O TÍTULO DE:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

ELABORADO POR:

DOLLY AMPARO MUÑOZ UPEGUI

SANGOLQUÍ, NOVIEMBRE DEL 2011

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR

DOLLY AMPARO MUÑOZ UPEGUI

COORDINADORA DE LA CARRERA

Máster Tatiana Páez

SECRETARIO ACADÉMICO

Abg. Mario Lozada Paredes.

Sangolquí, 9 de noviembre del 2011.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Srta. DOLLY AMPARO MUÑOZ UPEGUI como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA.

Sangolquí, _____

MC. Alma Koch
DIRECTORA

Ing. Pablo Araujo G.
CODIRECTOR

DEDICATORIA

A mis dos ángeles, quienes me han enseñado a descubrir mi verdadera vocación, mi abuelito[†] y mi sobrina María Sol.

Dolly Amparo Muñoz Upegui

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** y a mi **Familia** por su apoyo incondicional. A mis padres por ser ejemplo de vida, responsabilidad y dedicación. A mis hermanos por ser mis amigos y a mis amigos por ser mis hermanos.

Expreso mi gratitud a la ESPE y mis profesores en especial a la Máster Alma Koch y al Ingeniero Pablo Araujo por la ayuda científica y técnica en la elaboración de este proyecto.

A la empresa “Textiles Tornasol”, por el financiamiento del proyecto gracias al cual fue posible la realización del presente trabajo de investigación.

A mis colegas, Diana e Irina quienes han contribuido con su conocimiento y entrega en esta investigación, compartiendo la visión de un mundo mejor.

No puedo pasar por alto a mis compañeros por ser soporte durante mi vida universitaria. Por aquellas risas, amanecidas y vivencias diarias que se tornan en recuerdos irrepetibles y valiosos. Finalmente, quiero agradecer a Carito, Gaby, Danilo y Billy por su apoyo continuo durante la cristalización de ésta meta.

Dolly Amparo Muñoz Upegui

RESUMEN

La contaminación causada por el uso y gestión del agua ha provocado un serio deterioro ambiental. El cual ha obligado a las autoridades gubernamentales y municipales a crear regulaciones y normativas para crear mayor conciencia a nivel industrial y requerir el tratamiento de sus efluentes.

En la industria textil la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores de agua se ha convertido en una amenaza biológica. La presente investigación tiene por objetivo proponer una alternativa biológica y amigable con el ambiente para remediar aguas contaminadas de la industria textil utilizando el inóculo microbiano nativo I5, en una planta piloto de flujo continuo tipo pistón.

El diseño de la planta piloto consiste en un reactor tipo flujo pistón con capacidad de 50 litros, con cuatro compartimientos, en el cual se da la bioconversión del contaminante. El piloto incluye bombas peristálticas que controlan el caudal de entrada y salida del agua. Además de compresores de aire que permiten mantener las condiciones aerobias en el reactor. La adaptación del inóculo a las condiciones de trabajo se realizó mediante un escalado progresivo del inóculo I5 hasta obtener una concentración promedio sólidos suspendidos volátiles de 2806 mg SSV/L en el licor mixto.

Una vez alcanzada la adaptación de la biomasa se operó el piloto con un caudal de $1,08 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, en un tiempo de retención hidráulico de 48 horas proporcionando como resultado una remoción del 54% de DQO.

ABSTRACT

The pollution caused by the industrial water disposal is increasing day by day in such a way that it is becoming in a very serious environmental problem that have obligated to issue regulations and normative from government and municipal authorities, trying first of all to create awareness in the industries to make adequate treatment to the industrial effluents.

In the textile industry, in particular, the disposal of waste water toward water receptors is becoming in a very grave biological threatens. The present study proposes an alternative of an environmental friendly treatment by using biological method by with the I5 native microbial inoculum in a pilot plant of continuous flow.

The plant design consists of a reactor, piston type, of 50 liters of capacity, with compartments where contaminant bioconversion occurs. The plant includes peristaltic pumps to control the inlet and outlet flow and air compressors to maintain the aerobic conditions in the reactor. The adapting of the inoculum to the working conditions is made through the progressive scaling until obtaining the average concentration of suspended volatile solids of 2806 mg SSV/L in the mixed liquor.

Once reached the biomass adapting, the plant operates at flow of 1.08 L. h⁻¹, with a hydraulic retention time of 48 hours, obtaining, as a result, 54 % DQO removal.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-------------|
| HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS | II |
| CERTIFICACIÓN | III |
| DEDICATORIA | IV |
| AGRADECIMIENTOS..... | V |
| RESUMEN | VI |
| ABSTRACT | VII |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | VIII |
| LISTADO DE TABLAS | X |
| LISTADO DE FIGURAS..... | XI |
| LISTADO DE ANEXOS | XII |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 2 |
| 1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 4 |
| 1.4. MARCO TEÓRICO | 5 |
| CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS..... | 18 |
| 2.1. PARTICIPANTES | 18 |
| 2.2. ZONA DE ESTUDIO | 19 |
| 2.2.1. <i>Campo</i> | 19 |
| 2.2.2. <i>Laboratorio</i> | 19 |
| 2.3. PERÍODO DE TIEMPO DE INVESTIGACIÓN | 19 |
| 2.4. DISEÑO DEL REACTOR BIOLÓGICO..... | 19 |
| 2.5. PROCEDIMIENTOS..... | 20 |
| 2.5.1. <i>Obtención del inóculo de trabajo</i> | 20 |
| 2.5.2. <i>Escalado de la biomasa</i> | 22 |
| 2.5.3. <i>Parámetros de análisis</i> | 23 |
| 2.5.3.1. <i>Índice Volumétrico de Lodos (IVL)</i> | 23 |
| 2.5.3.2. <i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i> | 24 |
| 2.5.3.3. <i>Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor mixto (SSLV)</i> | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.3.4. Oxígeno Disuelto..... | 25 |
| 2.5.3.5. pH..... | 26 |
| 2.6. ANÁLISIS DE DATOS..... | 26 |
| CAPÍTULO 3: RESULTADOS..... | 27 |
| 3.1. DISEÑO DEL REACTOR BIOLÓGICO..... | 27 |
| 3.2. ESCALADO DE LA BIOMASA..... | 28 |
| 3.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA PILOTO..... | 29 |
| 3.4. PARÁMETROS DE ANÁLISIS..... | 30 |
| 3.5. DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DE REACTORES DE FLUJO CONTINUO A ESCALA REAL..... | 34 |
| CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN..... | 36 |
| 4.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA PILOTO..... | 36 |
| 4.2. ESCALADO Y ADAPTACIÓN DE LA BIOMASA..... | 38 |
| 4.3. OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO..... | 38 |
| 4.4. DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES CINÉTICAS Y ESTEQUIOMÉTRICAS..... | 41 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES..... | 43 |
| CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES..... | 45 |
| CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 47 |
| ANEXOS..... | 51 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Procesos textiles generadores de agua residual..... | 7 |
| Tabla 2. Parámetros contaminantes presentes en la empresa “Textiles Tornasol”..... | 8 |
| Tabla 3. Parámetros de operación establecidos para la implementación de la planta piloto..... | 29 |
| Tabla 4. Control de remoción de DQO Utilizando el inóculo microbiano nativo I5 en un periodo de 96 horas..... | 30 |
| Tabla 5. Constantes cinéticas de remoción de DQO, producción de biomasa y consumo de oxígeno en un reactor completamente mezclado (RCM)..... | 35 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema de un reactor tipo flujo pistón..... | 13 |
| Figura 2. Diagrama sobre las consideraciones fundamentales de diseño para una planta de tratamiento de aguas residuales..... | 14 |
| Figura 3. Diagrama de Flujo del Proceso de Tratamiento Biológico en la Planta Piloto..... | 20 |
| Figura 4. Diagrama de proceso del escalado progresivo del inóculo I5 a las condiciones reales de trabajo..... | 23 |
| Figura 5. Dimensiones del Reactor Biológico..... | 27 |
| Figura 6. Compartimientos dentro del Reactor Flujo Pistón..... | 27 |
| Figura 7. Reactor Flujo Pistón construido..... | 28 |
| Figura 8. Escalado progresivo del inóculo microbiano I5..... | 28 |
| Figura 9. Planta piloto implementada..... | 29 |
| Figura 10. Remoción de DQO en función del tiempo..... | 31 |
| Figura 11. Remoción de DQO y decaimiento microbiano en el transcurso del tiempo..... | 32 |
| Figura 12. Remoción de DQO y decaimiento bacteriano en el transcurso del tiempo al finalizar el tratamiento biológico..... | 32 |
| Figura 13. Concentración de oxígeno disuelto (O.D) en cada compartimiento del reactor biológico tipo flujo pistón en función del tiempo..... | 33 |

LISTADO DE ANEXOS

| | |
|---|--------------------------------------|
| ANEXOS..... | 51 |
| ANEXO 1: PLANOS DEL DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| ANEXO 2. PLANTA PILOTO EN FUNCIONAMIENTO..... | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| ANEXO 3. CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES CINÉTICAS DE UN REACTOR DE FLUJO CONTINUO TIPO PISTÓN PARA REMOCIÓN DE SUSTRATO, PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y REQUERIMIENTO DE OXÍGENO. | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| <i>Remoción de sustrato/DQO</i> | ¡Error! Marcador no definido. |
| <i>Producción de Biomasa</i> | ¡Error! Marcador no definido. |
| <i>Consumo de oxígeno</i> | ¡Error! Marcador no definido. |
| ANEXO 4. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL (Q) Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO θ_H | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del problema

La contaminación del agua se produce por el vertimiento en ella de compuestos orgánicos o inorgánicos, que al ser disueltos o suspendidos alcanzan una concentración superior al límite tolerable para su uso (Orozco, 2005). La fuente contaminante puede ser de origen doméstico, industrial, agrícola y/o natural. Sin embargo, debido al aumento poblacional y actividad industrial, las cargas contaminantes vertidas a cuerpos de agua dulce son cada vez mayores, provocando su deterioro (Rodríguez *et al.*, 2006).

En la industria textil, el consumo de agua se estima entre 100 y 170 m^3 de agua por tonelada de tela producida (Pey, 2008). El efluente residual contiene contaminantes como colorantes y subproductos orgánicos e inorgánicos generados a partir de sus reacciones químicas, además de pH alto, presencia de pelusas y fibras e insumos químicos utilizados en el acabado (Habibatt, 2006).

El agua residual de la industria textil es altamente contaminada, la presencia de colorantes interfiere en la actividad fotosintética de plantas acuáticas y microorganismos. La presencia de contaminantes orgánicos interfieren en el desarrollo de fauna y flora dentro y alrededor de los cuerpos receptores (Horan, 1991). En Ecuador más del 90% de los efluentes textiles se descargan directamente a la alcantarilla proliferando la contaminación y contribuyendo al deterioro ambiental (EMAP-Q, 2009).

De acuerdo a informes del Ministerio del Ambiente en el 2007 se inauguró en la provincia de Loja la primera planta de tratamiento de aguas residuales para mitigar la contaminación en el río Guayabal debido al vertimiento de agua residual de la industria azucarera. Es importante continuar investigando sobre nuevas alternativas a nivel nacional que permitan controlar y prevenir la contaminación de los recursos hídricos.

1.2. Justificación del problema

El creciente aumento de la demanda y consumo de agua se ha convertido en un problema que afecta negativamente la biodiversidad en muchas zonas del planeta. A partir de 1900, el desarrollo industrial y la extensión de la agricultura han sextuplicado la cantidad de agua empleada mientras que la población mundial “solo” se ha duplicado (Elías, 2009).

A nivel industrial, los costos de procesamiento de agua representan un mínimo porcentaje en relación a los costos de fabricación de un producto (Neverow & Dasgupta, 1998).

Según el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, actualmente el agua se está convirtiendo en una materia prima escasa. Existen campañas de concientización global para preservar los recursos naturales. Un estudio de talleres textiles en las provincia de Pichincha revela que se paga 0,72 centavos de dólar por cada metro cúbico de agua utilizada, tarifa doméstica y subsidiada (EMAAP-Q, 2010).

La industria textil ha provocado notables problemas medioambientales vinculados principalmente al uso y la gestión del agua, alto consumo de

energía y reactivos químicos (Blanco, 2009). El agua residual proveniente de la industria textil contiene altas concentraciones de materia orgánica e inorgánica, pH y color. En el proceso de manufactura se utilizan químicos orgánicos e inorgánicos, incluyendo polímeros, y volúmenes considerables de agua generando efluentes altamente contaminados y tóxicos (Habibat, 2006).

En Latinoamérica, muchas corrientes de agua son receptoras de descargas directas de residuos domésticos e industriales (Reynolds, 2002). El tratamiento de aguas residuales es necesario para la prevención de la contaminación ambiental y del agua, al igual que para la protección de la salud pública (Reynolds & Richards, 1996).

Existen varias alternativas para reducir La Demanda Química de Oxígeno (DQO) de aguas residuales utilizando métodos químicos, físicos, biológicos y combinados. Es indispensable realizar ensayos a nivel de laboratorio y en plantas piloto antes de emplear un tratamiento a escala real (Toca, 1997).

En Ecuador, se estima que aproximadamente el 60% de los cuerpos de agua dulce están contaminados por efluentes industriales (Recalde, 2009). Según datos estadísticos obtenidos del INEC, el 80% de las industrias a nivel nacional se encuentran asentadas en la región sierra y sus efluentes contaminados, sin tratar, son descargados a las alcantarillas y arrastrados a cuerpos receptores de agua (Moncayo, 2010). Ante esta problemática es necesario proponer sistemas para la depuración de aguas residuales en el país que permitan prevenir el aumento de la contaminación en el agua.

Al implementar un tratamiento biológico como herramienta para depurar aguas residuales, es necesario conocer los coeficientes cinéticos y estequiométricos de diseño para el tipo de agua residual que se va a tratar. Se considera necesario realizar ensayos piloto que simulen el tratamiento del agua

residual, para calcular dichos coeficientes (Orozco, 2005). Dos métodos fundamentales para efectuar ensayos piloto con el objetivo de reducir contaminantes de agua residual son: a) En reactores de flujo continuo y b) En reactores por lotes. Los reactores de flujo continuo son más confiables para la determinación de las constantes cinéticas y estequiometrias de diseño (Metcalf & Eddy, 2003).

A nivel nacional, las empresas que han implementado el tratamiento biológico para depuración de aguas residuales, están obligados a importar inóculos. En el país aún no se han desarrollado investigaciones a escala real sobre la eficiencia de inóculos nativos para remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas e industriales (Moncayo, 2010).

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar una planta piloto para remoción de DQO de aguas residuales de la industria textil, utilizando el inóculo microbiano nativo I5.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Comprobar la remoción de DQO en agua residual real utilizando el inóculo I5.

- Realizar el escalado de la biomasa, inóculo nativo I5, a volúmenes entre 10 y 20 litros.
- Determinar la concentración de sólidos suspendidos volátiles presentes en el agua residual textil y en su efluente tratado.
- Determinar las constantes cinéticas de crecimiento microbiano utilizando el inóculo nativo I5.
- Comprobar si la combinación del tratamiento biológico con electrocoagulación es efectiva para reducir la concentración de DQO a los niveles establecidos en la normativa 203 del Municipio de Quito.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Efluentes residuales de la industria textil

La industria textil representa uno de los campos más competitivos de producción a escala mundial (Neverow & Dasgupta, 1998). Los pequeños talleres textiles son vitales para las economías locales, su ubicación se encuentra cerca de ríos pequeños donde se vierten sus residuos que en general resultan altamente contaminantes (Elías, 2009).

El agua residual textil tiene características muy variables. Sus efluentes son difíciles de tratar debido a que poseen un intenso color, elevado pH y alta demanda química de oxígeno (Álvarez *et al.*, 2005). La gestión de aguas residuales contaminadas ha crecido los últimos años ya que se han promovido

leyes cada vez más restrictivas que exigen a las industrias del sector a tratar sus aguas, antes de verterlas al alcantarillado público. Este hecho incentiva al desarrollo e investigación de tecnologías para el tratamiento de aguas usadas en aplicaciones industriales (Blanco, 2009).

Las reacciones químicas para impregnar el color en fibras vegetales y animales generan compuestos orgánicos e inorgánicos que contribuyen al aumento de la cantidad de contaminantes presentes en agua residual de esta industria (Orozco, 2005). Se estima que alrededor del 65% del colorante empleado para el teñido se impregna en las telas y el 35% restante es arrastrado con agua (Álvarez *et al.*, 2005).

En la elaboración de telas, el proceso se divide en dos etapas: la fase seca y la fase húmeda. En la fase seca no se requiere de grandes volúmenes de agua, los procesos involucrados son: hiladuría y tejeduría. Por otro lado, la fase húmeda o de acabados requiere de volúmenes considerables de agua, los procesos involucrados son: lavado, desgomado, blanqueado, mercerización, tintura y estampado (Isik, 2004), según la Tabla 1.

**Tabla 1. Procesos textiles generadores de agua residual
(Mansilla et al., 2001; Moncayo, 2010)**

| Proceso | Porcentaje de descarga de AR | Características del AR |
|----------------|-------------------------------------|--|
| Desgomado | 15% | Agua cargada de materia orgánica y sólidos. |
| Descrude | 20% | Agua con ácido |
| Mercerización | | |
| Blanqueo | 65% | Agua con hipoclorito de sodio |
| Teñido | | Agua con colorantes dispersos, directos y reactivos, antiespumantes y álcalis |
| Lavado | | Agua caliente en pH alcalino para remover impurezas tales como tierra, grasas y fibras |

La mayoría de efluentes contaminados en la industria textil se generan en el proceso de acabados que comprende principalmente el descrude, blanqueo y teñido. En estas etapas se agregan una serie de insumos químicos, tales como tintes, detergentes, agentes, humectantes, dispersantes y penetrantes, sales inorgánicas como sosa caústica, sal textil, peróxido de hidrógeno, ácido acético, entre otros, los cuales son en su mayor parte lavados y retirados con el efluente (Habibat, 2006).

Según Toca (1997), El término que representa de manera aproximada el contenido total de materia orgánica presente en una muestra de agua residual, es la Demanda Química de Oxígeno conocida por las siglas DQO.

La DQO mide de manera indirecta la materia orgánica a través de la demanda de oxígeno de los compuestos orgánicos. Para descomponer químicamente la materia orgánica se utiliza un fuerte agente oxidante en un medio ácido a alta temperatura (Romero, 2000). Éste análisis permite calcular

la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica considerando la fracción biodegradable y no biodegradable (Orozco, 2005).

Por otro lado, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es un parámetro que se define como la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica presente en agua residual, mediante la acción microbiana en condiciones aerobias (Orozco, 2005; Romero 2000).

Las aguas residuales textiles se caracterizan por ser alcalinas con altas concentraciones de DQO y DBO, con valores superiores a 500 mg/L y 200 mg/L respectivamente (CESAQ, 2010).

En la empresa “Textiles Tornasol”, la Demanda Química de Oxígeno, el pH y la concentración de sólidos suspendidos son altos. En la Tabla 2, se detalla cada parámetro evaluado durante el año 2010 y el primer semestre del año 2011.

Tabla 2. Parámetros contaminantes presentes en la empresa “Textiles Tornasol” (Textiles Tornasol, 2011)

| PARÁMETRO | UNIDADES | NORMATIVA | RESULTADOS PROMEDIO | | | | |
|----------------------------------|----------|-----------|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L | 240 | 210 | 690 | 740 | 675 | 458 |
| pH | Unid pH | 5,0-9,0 | 10,4 | 10,6 | 10,5 | 10,8 | 10,3 |
| Sólidos suspendidos (SS) | mg/L | 95 | 118 | 126 | 59 | 103 | 58 |

a) Primer trimestre del 2010; b) Segundo Trimestre del 2010; c) Tercer Trimestre del 2010; d) Cuarto Trimestre del 2010; e) Primer trimestre del 2011

1.4.2. Tratamientos para depuración de aguas residuales

Tratamiento biológico

Los tratamientos biológicos constituyen una alternativa económica y eficiente en la remoción de componentes indeseables en el agua residual, aprovechando la actividad metabólica de los microorganismos (Orozco, 2005).

El metabolismo microbiano juega un papel primordial, de este depende el proceso de oxidación de la materia orgánica y por consiguiente determina el sistema que se va a implementar para remediar agua contaminada (Rodríguez *et al.*, 2006).

El tratamiento biológico involucra únicamente al tratamiento secundario, es decir la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual (Pandey *et al.*, 2007). Si el efluente a ser tratado contiene material particulado, pelusas, grasas e impurezas deberá someterse a un tratamiento primario según sus requerimientos (Hammer & Hammer, 2008).

Los tratamientos biológicos pueden involucrar: sistemas aerobios, anaerobios o anóxicos (Metcalf & Eddy, 2003). En los sistemas aerobios, la presencia de oxígeno hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen altos rendimientos energéticos, provocando generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua. La concentración idónea de Oxígeno Disuelto (O.D) en agua para tratamiento biológico debe mantenerse entre 2 y 6 mg/L a valores menores se presentan fenómenos de hipoxia y anoxia (Romero, 2000a).

En los sistemas anaerobios, el aceptor de electrones puede ser el dióxido de carbono o la propia materia orgánica obteniéndose como producto metano. La utilización de este sistema tendría como ventaja la obtención de un gas combustible. Finalmente, en los sistemas anóxicos el aceptor de electrones es el nitrato transformándose, entre otros, en N_2 , elemento completamente inerte. Por tanto es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (Rodríguez *et al.*, 2006).

Existe una gran variedad de sistemas biológicos para depurar aguas residuales dependiendo de las características del agua y carga orgánica a tratar (Bolaños, *et al.*, 2008).

El sistema de tratamiento biológico aerobio se subdivide en dos tratamientos, en medio suspendido y en medio fijo. En el tratamiento en medio suspendido, la biomasa se encuentra suspendida y mezclada con el agua residual sin estar adherida a ningún soporte sólido, mientras que el tratamiento en medio fijo, la biomasa crece adherida a un medio sólido usualmente un plástico de alta resistencia a los productos químicos (Orozco, 2005).

En la industria textil, el efluente contiene altas concentraciones de DQO, DBO, color y pH además de pelusas y fibras que interfieren en el tratamiento del agua residual (Habibatt, 2006).

El tratamiento biológico en la industria textil es útil para remoción simultánea de color y de DQO de sus efluentes contaminados (Sen & Demier, 2003). Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras (Mafla, 2010).

Un efluente contaminado con altas cargas de DQO y DBO se maneja mejor en un sistema aerobio en suspensión (Orozco, 2005). Una planta piloto determina las constantes cinéticas de la biomasa involucrada, para remover contaminantes del agua residual. En base a estos parámetros se diseña una planta de tratamiento de aguas residuales del efluente seleccionado a escala real, asegurando los resultados deseados (Blanco, 2009).

El tratamiento biológico es un método destructivo de la materia orgánica en el cual, el carácter oxidable del contaminante orgánico se transforma en compuestos no tóxicos o biodegradables (Rodríguez *et al.*, 2006).

La reducción de materia orgánica contaminante presente en el agua residual industrial depende del inóculo microbiano seleccionado; sin embargo, los valores de reducción fluctúan aproximadamente entre el 40 y 60% para DQO (Reynolds, 2002). Existe una eficiencia significativa del tratamiento biológico respecto a la remoción de DQO y DBO en sistemas de flujo continuo. En aguas residuales con altas cargas de DQO, valores superiores a $800 \text{ mg} * \text{L}^{-1}$, la efectividad del tratamiento no parece ser suficiente por lo cual se recomienda utilizar un método adicional ya sea un tratamiento físico o químico, como pre-tratamiento o post-tratamiento al proceso (Bornhardt & Diez, 1998; Delgado, *et al.*, 2006).

Tratamiento electroquímico

El tratamiento electroquímico se basa en la utilización de energía eléctrica como vector de descontaminación en agua (Rodríguez *et al.*, 2006).

Este proceso provoca reacciones de óxido-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo, utilizando un electrolito presente en el agua (UA, 2009).

Una de las principales aplicaciones industriales de la tecnología electroquímica es el tratamiento efectivo de aguas residuales con una elevada concentración de compuestos orgánicos (UA, 2009; Rodríguez, *et al.*, 2006). El tratamiento biológico presenta ciertas limitaciones para valores altos de DQO y compuestos tóxicos, por lo cual el tratamiento químico es una alternativa conjunta para remoción de contaminantes orgánicos (Toca, 1997). En el caso de la electrocoagulación, electroflotación o electrofloculación los productos formados por electrolisis, sustituyen a los reactivos químicos y supone una alternativa viable para remoción de contaminantes (Rodríguez *et al.*, 2006).

En el tratamiento de aguas residuales se ha comprobado la eficiencia en la remoción de DQO en el proceso de electrocoagulación, de aproximadamente el 65% (Ordoñez & Mercado, 2007). El proceso para reducción directa de contaminantes orgánicos e inorgánicos, se produce por una transferencia de electrones en la superficie del ánodo con lo cual se evita manipular agentes oxidantes y posibles contaminantes (Metcalf & Eddy, 2003).

1.4.3. Diseño de una planta de tratamiento biológico

El tratamiento biológico de aguas residuales es una bioconversión con agentes biológicos de un sustrato altamente contaminante en un producto menos contaminante (Orozco, 2005).

Una planta para purificación de agua tiene como objetivo integrar, de manera económica, los procesos y operaciones de tratamiento para que, cuando sea operada pueda proveer sin interrupción el caudal de diseño y satisfacer los requerimientos de calidad (Romero, 2000).

El reactor biológico juega el papel más importante en un tratamiento de aguas residuales por ello es importante realizar una adecuada caracterización del efluente a tratarse y ensayos piloto que permitan recopilar información de operación (Romero, 2000).

Un RFP consiste en un tubo cilíndrico que normalmente opera en estado estacionario (López & Borzacconi, 2009). Tratándose de un sistema biológico, el sustrato es decir el contaminante se consume continuamente a medida que fluye a lo largo del reactor (Metcalf & Eddy, 2003).

El proceso de remoción de DQO en el RFP utilizado para el tratamiento del agua residual textil se detalla a continuación

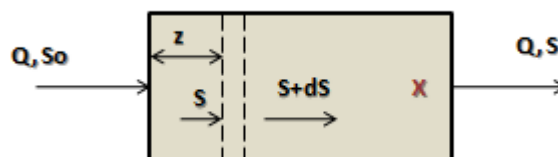


Figura 1. Esquema de un reactor tipo flujo pistón, donde S_0 , es el sustrato o la concentración de DQO inicial; S , es el sustrato o la concentración de DQO final; z , es la distancia entre cada compartimiento; Q , es el caudal de trabajo.

El agua residual viaja a través de un reactor alargado sufriendo en su recorrido una bio-transformación en dirección z , el agua residual se mueve con

una velocidad u , la cual depende del caudal. El flujo de agua en cada posición z_i del RFP está asociada a un tiempo de tránsito t_i o al tiempo de retención hidráulico que en ese punto ha tenido el licor mixto. En consecuencia se ha producido una conversión biológica del contaminante. Se puede suponer entonces que $dS/dt = dS/dz$, de acuerdo con la cinética de Mc Kinney el gradiente en un RFP se puede representar como: $-\frac{dS}{dz} = kS$. En cada punto de z existe una concentración definida de S diferente a las demás en otras posiciones del reactor (Orozco, 2005).

Consideraciones en el diseño de una planta

La caracterización del agua residual es primordial para realizar un diseño, cada efluente tiene estándares específicos de acuerdo a su procedencia (Hammer & Hammer, 2008). Cuando no existe información suficiente sobre la calidad del agua residual a tratarse, además de un programa de muestras y análisis, se debe implementar una investigación piloto para determinar los parámetros de diseño y operación a escala real (Reynolds & Richards, 1996).

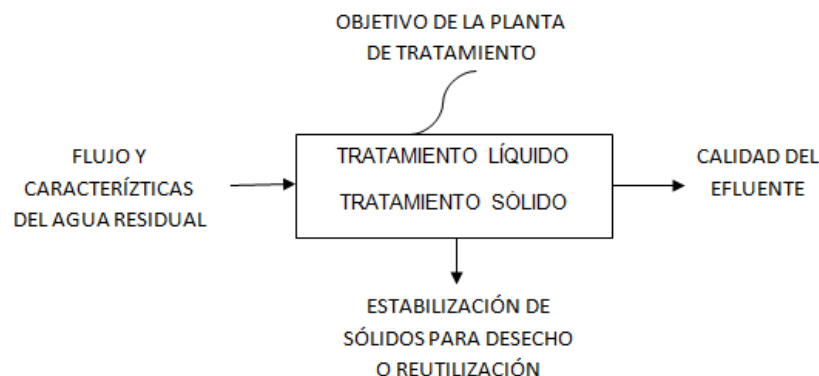


Figura 2. Diagrama sobre las consideraciones fundamentales de diseño para una planta de tratamiento de aguas residuales (Reynolds & Richards, 1996).

La selección de los valores de flujo y carga deben considerarse de acuerdo a la operación establecida por la industria, incluyendo infiltraciones/influjos que puedan presentarse, además de factores climáticos (Hammer & Hammer, 2008). Es importante, también determinar el tipo de reactor que se va a implementar. Con base a esta información, se realiza el ensayo piloto de flujo continuo simulando condiciones reales (Bolaños *et al.*, 2008).

Parámetros de diseño

El tratamiento biológico aerobio en suspensión, en un sistema completamente mezclado, es el más utilizado para el tratamiento de aguas residuales industriales (Orozco, 2005).

En un sistema completamente mezclado, se mantiene homogénea la concentración en el reactor, mediante agitadores superficiales o difusores que a su vez proporcionan el oxígeno necesario para la actividad metabólica (Metcalf & Eddy, 2003). Por otro lado, en un Reactor con Flujo a Pistón (RFP) no existe mezcla en sentido longitudinal. El licor mixto avanza como pistón a lo largo del reactor, en cuyo trayecto ocurre la bioconversión. Una vez que el sistema alcanza las condiciones estables de tratamiento, la concentración del agente contaminante es constante en cada punto, pero variable a lo largo del reactor. Este tipo de reactores ofrecen un mayor porcentaje de remoción de contaminantes respecto a un sistema completamente mezclado (Orozco, 2005).

Según Delgado y sus colaboradores (2006), el volumen de un reactor para el tratamiento aerobio de aguas residuales a escala piloto oscila entre 40 y

80 litros, proporcionando datos reales. En base a esta investigación estimó un volumen de trabajo de 50 litros.

Los parámetros más importantes para este tipo de tratamientos se describen a continuación:

Tiempo de retención hidráulico (θ_H), es el tiempo promedio que un volumen elemental de agua residual permanece en el tanque, desde la entrada hasta la salida. Este parámetro define el tiempo promedio en el cual el sustrato orgánico está sometido a tratamiento (Horan, 1991; Orozco, 2005).

Tiempo de retención celular (θ_c), es el tiempo promedio en el cual la biomasa permanece en el reactor antes de ser desechada. En un sistema sin recirculación $\theta_H = \theta_c$ (Orozco, 2005).

Tiempo de duplicación celular, es el tiempo promedio de adaptación de la biomasa en el medio circundante. Se refiere al crecimiento exponencial cuando no existe limitación de sustrato (Metcalf & Eddy, 2003).

Sólidos suspendidos volátiles (SSVL), representan a la cantidad de microorganismos presentes en el licor mixto. Éste parámetro se mide por peso o gravimétricamente.

Carga orgánica (F/M), es la cantidad de alimento por unidad de biomasa que reciben diariamente los microorganismos. Se mide en términos de [kg DQO]/[kg SSVL.día] o [kg DBO]/[kg SSVL.día] (Reynolds & Richards, 1996). La carga orgánica es útil para dimensionar el tamaño del reactor.

Normalmente está entre 0,05 y 1,5 de [kg DQO]/[kg SSVL.día] y se utiliza principalmente en reactores aerobios en medio suspendido (Orozco, 2005).

Índice volumétrico de lodos (IVL), indica la capacidad de separación de la biomasa y el licor mixto. Lodos con buena asentabilidad deben tener un IVL menor de 300 a valores mayores los lodos son difíciles de separar y saldrán mezclados con el agua residual a la salida del tratamiento (Mara & Horan, 2003; Orozco, 2005).

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Participantes

El desarrollo investigativo de este proyecto fue llevado a cabo en el laboratorio de Microbiología Ambiental del Centro de Investigaciones Científicas de la Escuela Politécnica del Ejército y en las instalaciones de la empresa “Textiles Tornasol”.

El financiamiento para la implementación y monitoreo de la planta piloto para el tratamiento biológico de aguas residuales de la industria textil lo asumió la empresa “Textiles Tornasol”, beneficiaria del proyecto.

Las personas que participaron en el desarrollo y ejecución del presente proyecto son: Dolly Muñoz Upegui en la planificación, desarrollo y monitoreo de la planta piloto, Máster Alma Koch, directora del Proyecto de Graduación, Ingeniero Pablo Araujo, codirector del Proyecto de Graduación y el Ing. Xavier Jaramillo, Jefe de Producción de la empresa “Textiles Tornasol”.

2.2. Zona de Estudio

2.2.1. Campo

La recolección de muestras de agua residual textil fue realizada en la descarga de efluentes de empresa “Textiles Tornasol” ubicada en la calle Cacha, Lote 5 y Giovanni Calles, sector de Carapungo.

2.2.2. Laboratorio

El procesamiento y análisis de las muestras fue realizado en el Laboratorio de Microbiología Ambiental del Centro de Investigaciones Científicas (CEINCI) de la Escuela Politécnica del Ejército, localizada en la Av. General Rumiñahui s/n Sangolquí, Ecuador.

2.3. Período de tiempo de investigación

El presente trabajo se realizó entre los meses de Enero y Septiembre del 2011.

2.4. Diseño del reactor biológico

El reactor biológico que se diseñó, construyó y monitoreó para reducir la alta concentración de DQO en la empresa “Textiles Tornasol” se basa en un tanque longitudinal, con flujo pistón. El suministro de oxígeno es constante en el primer compartimiento del reactor por medio de aireación difundida a través de burbujas (Orozco, 2005).

El tanque utilizado como reactor es un balde de boca ancha de 15 galones de capacidad, con una abertura de 30x54 cm en el eje longitudinal. Existen cinco separaciones de acrílico de 3mm de espesor que simulan un flujo pistón en su interior. La primera separación tiene una longitud de 26cm, punto de inicio en el cual la biomasa microbiana se adapta a las condiciones del agua pre-tratada. Mientras que las láminas restantes se encargan en sí del proceso de reducción del contaminante, se encuentran distanciadas unas de otras por 6,5cm. En el extremo terminal del tanque se encuentra una válvula de agua que permite la salida del agua tratada biológicamente (Anexo 1 y 2).

La planta piloto cuenta además con un tanque de alimentación al reactor biológico, con agua electrocoagulada cuya capacidad es de 55 galones. Dos bombas peristálticas, cuyo caudal en operación es $18 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ y un tanque de almacenamiento del agua tratada (Figura 3).

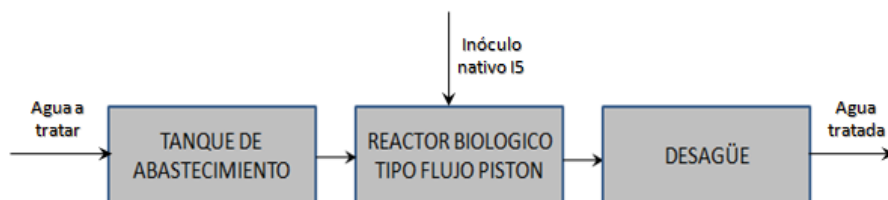


Figura 3. Diagrama de Flujo del Proceso de Tratamiento Biológico en la Planta Piloto (Muñoz, 2011)

2.5. Procedimientos

2.5.1. Obtención del inóculo de trabajo

El inóculo I5 se obtuvo por la exposición de agua residual sintética con colorantes de la industria textil al ambiente (Moncayo, 2010). Éste consorcio

microbiano ha sido objeto de estudio durante un período de investigación que comprende más de dos años.

Las investigaciones realizadas están relacionadas con la contaminación y toxicidad de los efluentes textiles. Los estudios ejecutados utilizando el inóculo nativo I5 (Moncayo, 2010) se basan en la remoción de color, metales pesados (Cromo y Zinc) y compuestos orgánicos de alta toxicidad, como el fenol, en agua sintética a nivel de laboratorio (Moncayo, 2010; Guevara, 2010; Montenegro, 2010 & García, 2011). Obteniéndose resultados alentadores que estimulan a continuar la investigación con agua residual real.

El inóculo microbiano I5 (Moncayo, 2010) fue proporcionado por el Laboratorio de Microbiología Ambiental del Centro de Investigaciones Científicas (CEINCI) de la ESPE. El cual fue reproducido en el medio de cultivo Jiang *et al.*, 2004 modificado en la fuente de calcio, magnesio y hierro, utilizando como fuente de carbono glucosa. La composición del medio fue: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 56 g/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 19,6 g/L; NaCl 1,4 g/L; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 1,92; K_2HPO_4 , 14g/L; KH_2PO_4 , 28 g/L; EDTA-Fe 0,03 g/L y Glucosa, 70 g/L. Cada una de las soluciones stock fueron esterilizadas por separado, enfriadas y unificadas a temperatura ambiente. Finalmente, se aforó al volumen requerido con agua estéril fría.

Dicho cultivo madre se homogenizó, manteniendo una relación 10:100 se inoculó I5 en el medio de cultivo Jiang *et al.*, 2004 modificado (Moncayo, 2010). A continuación, se incubó el medio a una temperatura de 35°C por un periodo de 48 horas.

2.5.2. Escalado de la biomasa

En la fase de escalado se pretende promover la adaptación del inóculo I5 (Moncayo, 2010) a las condiciones reales de trabajo, en pasos progresivos que permitan llegar a la concentración de SSVL óptimas para su desarrollo.

En un recipiente de capacidad de ocho litros se vertieron cuatro litros del inóculo nativo I5 (Moncayo, 2010) junto con dos litros de agua electrocoagulada completando un volumen total de seis litros. Se mantuvo aireación constante y se tomaron muestras de agua cada ocho horas hasta que la biomasa estuvo adaptada a las condiciones del agua a tratar. La aireación se controló utilizando el medidor portátil de oxígeno disuelto SPEC SCIENTIFIC 850041 D.O. Meter Kit. El pH se determinó con bandas de pH.

Una vez adaptada la biomasa al medio, en el reactor biológico tipo flujo pistón se vertió los seis litros mencionados previamente y se adicionó cuatro litros de agua electrocoagulada a tratar completando un volumen total de diez litros, de igual manera se tomaron muestras cada ocho horas. Las variables de proceso O.D y el pH también se controlaron durante el mismo periodo. Una vez comprobada la adaptación se procedió a adicionar cuatro litros de agua electrocoagulada. Se repitió el mismo procedimiento. (Figura 4 y 8)

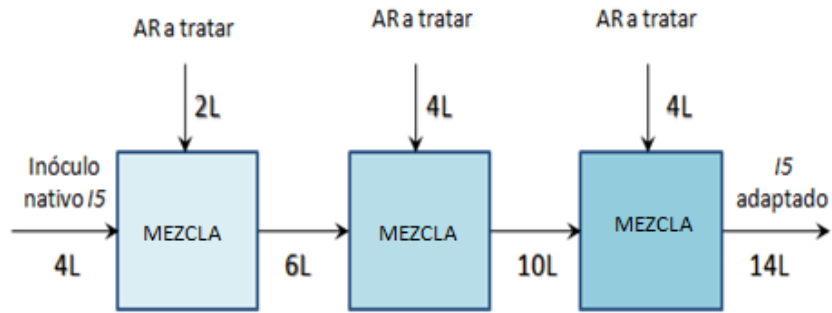


Figura 4. Diagrama de proceso del escalado progresivo del inóculo I5 a las condiciones reales de trabajo (Muñoz, 2011).

2.5.3. Parámetros de análisis

Los parámetros básicos analizados en el desarrollo de este proyecto fueron: Índice Volumétrico de Lodos (IVL), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSLV), Oxígeno Disuelto (OD) y pH (Mara & Horan, 2003).

2.5.3.1. Índice Volumétrico de Lodos (IVL)

Para determinar la capacidad de sedimentación del inóculo microbiano I5 (Moncayo, 2010) se tomó un litro de licor mixto y se dejó reposar durante 30 minutos. A continuación, se filtró la muestra para determinar la cantidad de sólidos suspendidos presentes en la muestra.

Se determinó el IVL del licor mixto con la siguiente fórmula:

$$IVL = \frac{V_{Lodos}}{Ms} * 1000$$

Donde: V_{Lodos} (mL), es el volumen de lodos producidos en un litro de muestra a los 30 minutos. Ms (mg), Masa de sólidos suspendidos totales en la muestra (Sawyer, 2003).

2.5.3.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se utilizó viales comerciales marca HACH para determinar la cantidad de DQO presente en el agua residual textil. El rango de DQO que los viales revelan varía entre 20 y 1500 ppm.

En cada vial se añadió 2mL de muestra a analizar. Inmediatamente se coloca en un digestor de muestras Spectroquant TR 320 marca MERK durante dos horas a una temperatura de 148°C. Una vez fríos, se llevó la lectura en un espectrofotómetro marca HACH DR. 2800 a una longitud de onda de 600 nm.

2.5.3.3. Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor mixto (SSLV)

El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo a lo indicado en “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2004)”, sin modificaciones.

De cada muestra se tomó 20mL y se filtró con papel filtro marca WHATMAN de porosidad 0,1mm. Una vez filtrado, el papel se desenrolló e ingresó a un horno de mufla a una temperatura de $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$. Una vez frío, el disco de filtro se transfirió a un desecador para proceder a su enfriamiento final en una atmósfera seca.

El papel filtro se pesó antes y después del filtrado. El cálculo para determinar la cantidad de SSLV se basó en la siguiente fórmula:

$$mg \text{ SSLV} = \frac{A - B \times 1000}{Vol. de muestra, (ml)}$$

Donde: *A*, es el peso del papel filtro después del filtrado con el agua tratada y *B*, es el peso del papel filtro antes del filtrado.

Con estos datos se pudo determinar la cantidad de biomasa presente en las muestras.

2.5.3.4. Oxígeno Disuelto

La medición de este parámetro se realizó con el equipo portátil SPEC SCIENTIFIC 850041 D.O. Meter Kit con una apreciación de $\pm 0,05$.

2.5.3.5. pH

El pH fue medido con papel indicador marca MACHEREY-NAGEL. Con un rango de 0 a 14 y una apreciación de ± 1 pH.

2.6. Análisis de Datos

Los datos obtenidos fueron procesados en hoja electrónica para obtener gráficas descriptivas de la eficiencia del tratamiento biológico en agua electrocoagulada.

Las constantes cinéticas y estequiométricas se determinaron en base a los datos obtenidos en la planta piloto, a partir de un balance de masas para remoción de sustrato y la ecuación de Orozco para la producción de biomasa (Anexo 3).

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1. Diseño del reactor biológico

Un tanque cilíndrico de capacidad 15 galones se utilizó como reactor biológico. En la Figura 5, se indica las dimensiones del reactor y en la Figura 6, se muestra el reactor con los deflectores en el interior.

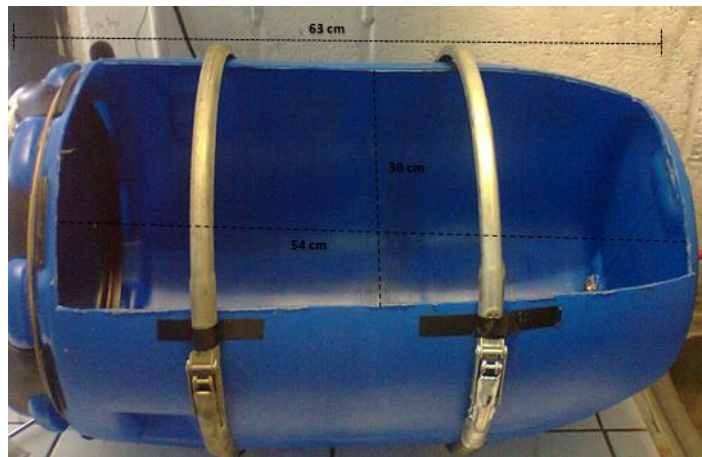


Figura 5. Dimensiones del Reactor Biológico (Muñoz, 2011).

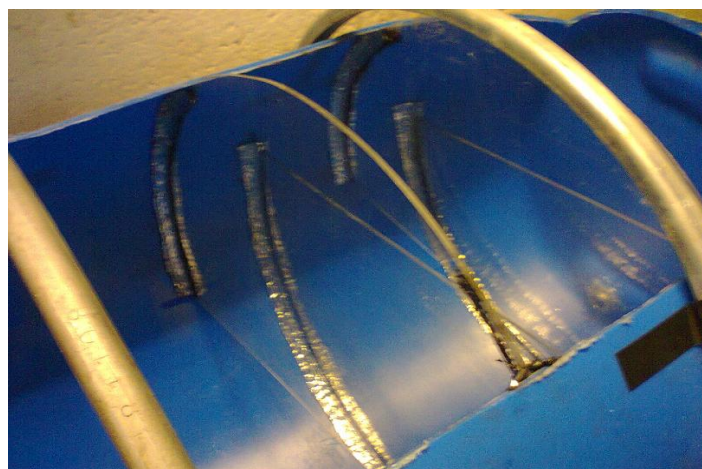


Figura 6. Compartimientos dentro del RFP (Muñoz, 2011).

En la Figura 7, se muestra el reactor construido con las características de un reactor tipo flujo pistón con 5 deflectores en su interior.



Figura 7. RFP construido (Muñoz, 2011)

3.2. Escalado de la biomasa

El proceso de escalado del inóculo, en el agua residual textil a tratar fue progresivo, se realizó en tres fases como se indica en la Figura 8. En cada una de las fases, la concentración de SSVL fue la óptima en el licor mixto.

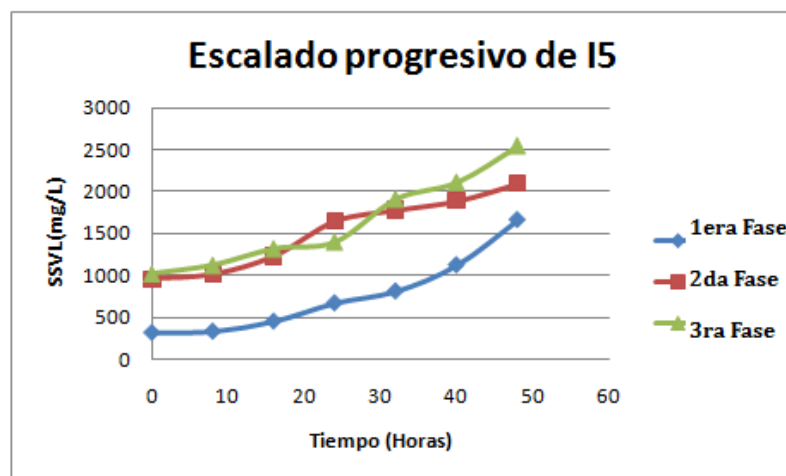


Figura 8. Escalado progresivo del inóculo microbiano I5

3.3. Implementación de la planta piloto

Una vez construido el reactor tipo flujo pistón y el inóculo I5 (Moncayo, 2010) adaptado a las condiciones reales del agua a tratar, se determinó los parámetros de operación de la planta piloto como se indica en la Tabla 3 y en el Anexo 2.

Tabla 3. Parámetros de operación establecidos para la implementación de la planta piloto (Muñoz, 2011)

| Parámetros | Unidad | Valor |
|--------------------------------|-------------------|-------|
| Caudal | L.h ⁻¹ | 1,08 |
| Tiempo de retención hidráulico | h | 48,00 |
| Volumen | L | 50,00 |

La planta piloto se implementó en la empresa “Textiles Tornasol” (Figura 9)

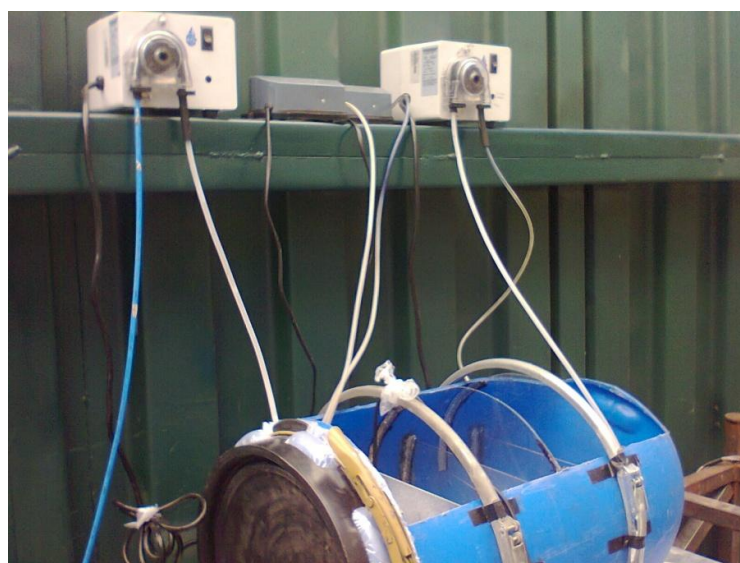


Figura 9. Planta piloto implementada (Muñoz, 2011)

3.4. Parámetros de análisis

3.4.1. Índice volumétrico de lodos (IVL)

El IVL se determinó antes y después de la operación del piloto proporcionando como resultados aproximados 500 mL/g y 225 mL/g respectivamente.

3.4.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Las pruebas para la determinación de la capacidad de remoción de DQO se realizaron en la planta piloto en operación, con el inóculo microbiano nativo I5 (Moncayo, 2010) adaptado a las condiciones de trabajo.

Una vez en operación el piloto, se tomó muestras cada 24 horas para monitorear la remoción de DQO como se indica en la Tabla 4. Además se observa una leve variación de la DQO inicial en función del tiempo.

Tabla 4. Control de remoción de DQO Utilizando el inóculo microbiano nativo I5 en un periodo de 96 horas.

| Tiempo (Horas) | DQO inicial* (mg.L⁻¹) | DQO final (mg.L⁻¹) |
|-----------------------|---|--------------------------------------|
| 0 | 808 | -- |
| 24 | 802 | 540 |
| 48 | 799 | 375 |
| 72 | 796 | 672 |
| 96 | 796 | 802 |

*La DQO inicial varía por la interacción del medio ambiente.

La remoción de DQO fue progresiva durante las 48 horas iniciales de operación de la planta piloto hasta llegar a un porcentaje de remoción máximo de 53,58% \approx 54%. Después de este período, la remoción del contaminante fue disminuyendo, al tiempo $t=96$ horas la degradación de DQO es prácticamente nula (Figura 10).

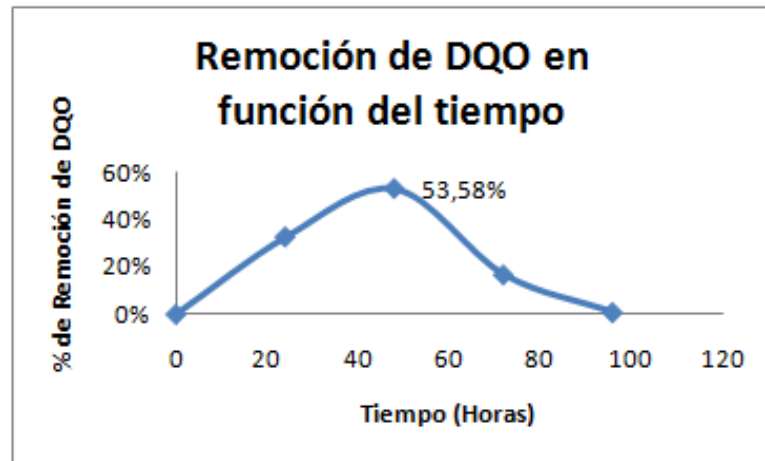


Figura 10. Remoción de DQO en función del tiempo.

3.4.3. Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor mixto (SSVL)

En el primer compartimiento del reactor se evidenció la reducción de la concentración SSVL, lo cual indica que la biomasa se estuvo transfiriendo de un compartimiento a otro, permitiendo la remoción del contaminante a lo largo del reactor biológico en un tiempo de retención hidráulico de 48 horas (Figura 11).

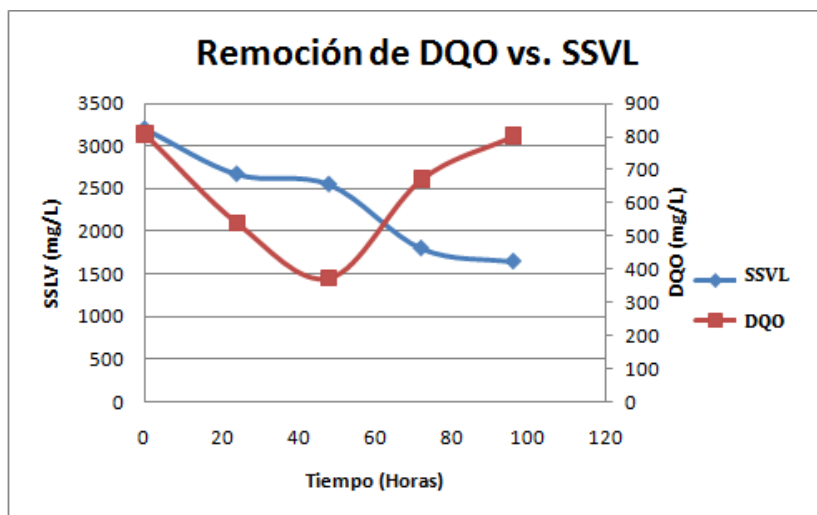


Figura 11. Remoción de DQO y decaimiento bacteriano en el transcurso del tiempo.

En el último compartimiento del reactor se demuestra que existe remoción de DQO y la reducción de SSVL (Figura 12). Aun tiempo $t=48$ horas la DQO se redujo en un 54% y la concentración de SSVL disminuyó de 3200 mg/L a 1290 mg/L.

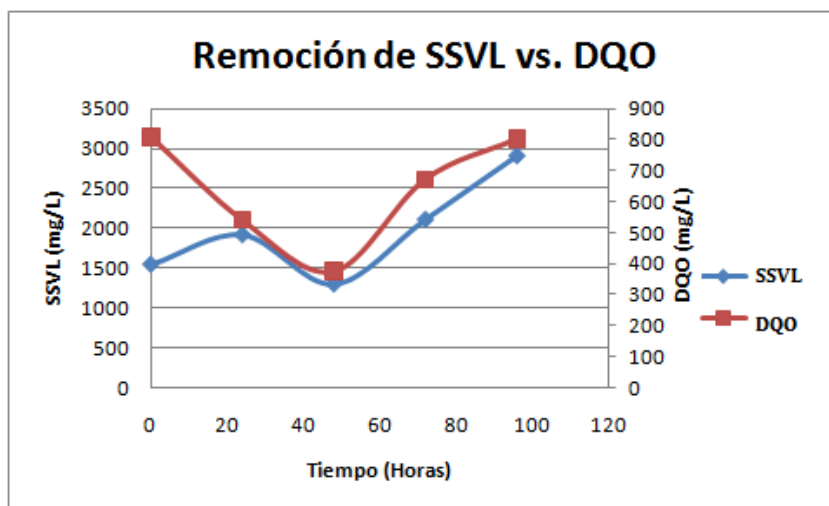


Figura 12. Remoción de DQO y decaimiento bacteriano en el transcurso del tiempo al finalizar el tratamiento biológico.

3.4.4. Oxígeno Disuelto (O.D)

El O.D se controló en el primer, segundo y tercer compartimiento del reactor biológico durante el periodo de experimentación de 96 horas. En el primer compartimiento la concentración de O.D fluctuó entre 4,23 mg/L y 3,46 mg/L; en el segundo compartimiento entre 2,87 mg/L y 2,13 mg/L y en el tercer compartimiento entre 1,6 mg/L y 0,54 mg/L (Figura 13).

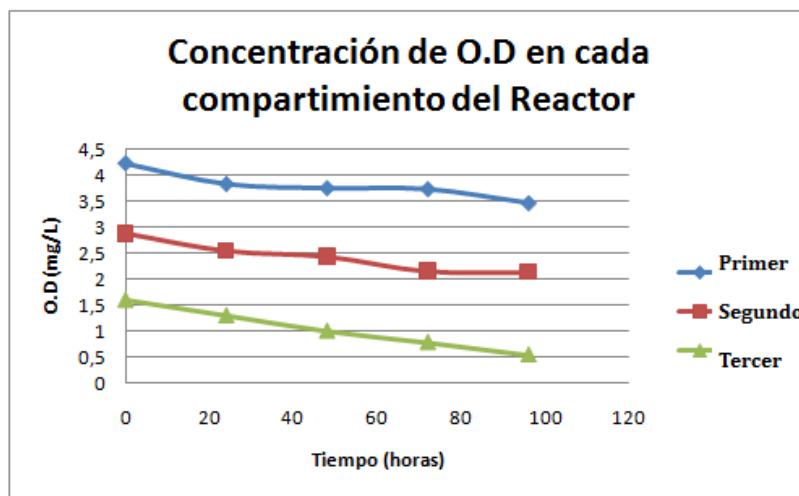


Figura 13. Concentración de oxígeno disuelto (O.D) en cada compartimiento del reactor biológico

3.4.5. pH

El pH del agua residual a tratar fue de 10, al adicionar el inóculo microbiano el pH se estabilizó en 7 y se mantuvo durante todo el tratamiento.

3.5. Determinación de las constantes de reactores de flujo continuo a escala real

Las constantes cinéticas de la remoción de sustrato, se determinaron en función de la variación de la concentración DQO a lo largo del reactor (Horan, 1990). Mediante un balance de masas se determinaron las constantes para la remoción de DQO y producción de biomasa (Anexo 2).

En la Tabla 5 se exponen las constantes para la remoción de DQO, producción de biomasa y consumo de oxígeno obtenidas a partir de la operación de la planta piloto con agua residual textil.

Tabla 5. Constantes cinéticas de remoción de DQO, producción de biomasa y consumo de oxígeno en un RFP.

| Constantes | | | Unidad | Valor | |
|------------------------------|----------------|---|-----------------------------|--------|----------------------|
| Remoción de sustrato | U | Tasa neta de remoción de sustrato | mg DQO/ mg SSVL*d | 0,079 | |
| | K _m | Cte cinética de saturación de Monod | mg DQO/L | 68,531 | |
| | k _o | Máxima tasa de remoción unitaria | Día ⁻¹ | 0,067 | |
| | K | Tasa de remoción de sustrato | (mg.día/L) ⁻¹ | | 9,7*10 ⁻⁴ |
| Producción de Biomasa | dx/xdt | Tasa neta de crecimiento de biomasa | Día ⁻¹ | 0,195 | |
| | Y | Coficiente estequiométrico de producción | mgSSVL/ mgDQO | 0,386 | |
| | K _e | Coficiente endógeno | Día ⁻¹ | 0,114 | |
| Consumo de Oxígeno | β | Coficiente estequiométrico de conversión de sustrato en oxígeno respirado | mgO ₂ / mgDQO | 0,554 | |

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN

La depuración de aguas residuales ha tomado fuerza en los últimos años debido al progresivo agotamiento de las fuentes naturales de abastecimiento (Elías 2009). El presente trabajo revela una alternativa viable y eficiente para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil utilizando el inóculo microbiano nativo I5 (Moncayo, 2010).

4.1. Diseño e implementación de la planta piloto

Las aguas residuales industriales tienen características físico-químicas y biológicas variables, hecho que influye en el diseño del sistema de tratamiento (Rodríguez *et al.*, 2003).

El diseño del reactor biológico se basó en las características del inóculo microbiano I5 (Moncayo, 2010). Se realizó pruebas de Índice Volumétrico de Lodo (IVL) del inóculo con el agua residual a tratar obteniéndose un IVL aproximadamente de 500. Lodos con buena asentabilidad deben tener un IVL menor de 300, a valores mayores los lodos son difíciles de separar y salen mezclados con el agua residual a la salida del tratamiento (Mara & Horan, 2003; Orozco, 2005).

La baja capacidad de sedimentación del inóculo interfiere en la lectura de resultados pues la biomasa aporta a la Demanda Química de Oxígeno (Reynolds & Richards, 1996), por ello es necesario proponer un sistema de tratamiento que permita obtener resultados confiables.

Ante la pobre capacidad de sedimentación del inóculo, se propuso un diseño tipo flujo pistón para el reactor biológico. Al final del tratamiento el IVL reportado fue aproximadamente de 225 mL/g valor que permite suponer que el inóculo logró sedimentar. Aunque el IVL obtenido al finalizar el tratamiento es menor a 300, según Romero (2000a) un IVL ideal para una planta de tratamiento de aguas residuales debe ser menor a 150 mL/g.

En un reactor flujo pistón, el licor mixto avanza como pistón a lo largo del tanque en cuyo trayecto sufre una bioconversión. El efluente tiene la calidad existente en el último compartimiento del reactor biológico (Orozco, 2005). Una de las características principales de este tipo de reactores es que a través del flujo longitudinal, la biomasa y otros agentes tienden a aglomerarse y decantar conforme avanza el fluido a lo largo del tanque, promoviendo un efluente clarificado al finalizar el tratamiento (Elías, 2009).

La implementación de la planta piloto se inició con la determinación de tiempo de duplicación de la biomasa, caudal y tiempo de retención hidráulico. Según Rojas (2000) una vez definidos estos parámetros experimentalmente se puede determinar las constantes cinéticas de la biomasa involucrada en el tratamiento biológico.

Para la determinación del caudal de operación las bombas peristálticas utilizadas (Anexo 1) no tenían un caudal definido por ello se tuvo que determinar el caudal con ayuda de una probeta. Una vez obtenidos todos los caudales que las bombas pueden ofrecer, se procedió a probar en el reactor biológico junto con el licor mixto. El mejor resultado de estas pruebas se tomó de base para la operación del piloto.

4.2. Escalado y adaptación de la biomasa

El inóculo microbiano nativo I5 a nivel de laboratorio se desarrolló adecuadamente en medio sintético a un pH neutro (Moncayo, 2011). El escalado fue progresivo para permitir la adaptación de los microorganismos a las condiciones reales de trabajo, variaciones de pH y carga. El pH del agua electrocoagulada a tratar fue alcalino, osciló entre 9 y 10.

Una vez mezclados el inóculo y el agua electrocoagulada a tratar, el licor mixto se mantuvo en un pH constante de 7. Se presume que los microorganismos se adaptaron a las condiciones reales del agua residual.

4.3. Operación de la planta piloto

Control de las variables de proceso

Las variables de proceso que se monitorearon *in situ*, cada 24 horas, fueron Oxígeno Disuelto (O.D) y pH.

El control del Oxígeno Disuelto (O.D) es determinante para comprobar que el inóculo esté adaptándose al medio. A valores menores a 2 mg O.D/L existe la presencia de microorganismos filamentosos, los cuales dificultan la sedimentación (Nenerow & Dasgupta, 1998).

El O.D para un tratamiento de aguas residuales en un sistema aerobio debe oscilar entre 2 y 6 mg O.D/L. En la figura 13 se evidencia como disminuye el O.D en cada uno de los compartimientos del RFP.

En el primer y segundo compartimiento, el O.D se mantuvo en los niveles idóneos para un tratamiento aerobio, en el tercer compartimiento los niveles se redujeron considerablemente ya que no existieron aireadores, en este punto es donde se empezó a sedimentar la biomasa.

El pH se mantuvo constante entre 6 y 7 durante toda la experimentación en el reactor tipo pistón de flujo continuo.

Control de variables de producción

El monitoreo de la remoción de DQO y presencia de SSVL durante la operación del piloto fueron las variables de producción evaluadas.

El porcentaje de remoción de DQO del agua residual de la empresa "Textiles Tornasol" fue de 54% en un periodo de 48 horas con un RFP en un sistema aerobio, evidenciándose la capacidad degradadora del inóculo nativo I5.

Para comprobar que en realidad el consorcio microbiano nativo I5 se encuentre degradando el contaminante se procedió a determinar la concentración de sólidos suspendidos volátiles presentes en primer y último compartimiento del reactor biológico como lo indican las Figuras 11 y 12. Según Rojas (2000b) la concentración de SSVL en el licor mixto oscila entre 1500 y 10000 mg SSVL/L. En la experimentación se comprobó que los SSVL

en el primer compartimiento se reducen gradualmente de 3200 hasta 2550 mg SSVL/L en el tiempo de retención hidráulico de 48 horas.

A medida que el agua se traslada de compartimiento en compartimiento, la biomasa realiza su trabajo en la remoción del contaminante. Al final del proceso, se obtuvo un efluente bajo en DQO respecto a la muestra inicial y una concentración de SSVL de 1290 mg SSVL/L. Este último valor revela que la biomasa presente al final del proceso pudiera no ser suficiente para continuar la degradación.

Cada consorcio microbiano tiene sus propias características. Para este caso el inóculo I5 trabaja eficientemente en la remoción de DQO con una concentración promedio de 2806,6 mg SSVL/L de agua residual textil. A valores cercanos a 1000 mg SSVL/L, la eficacia de remoción tiende a reducirse.

Según Romero (2000b), la concentración idónea de SSVL en el efluente tratado biológicamente a escala real debe ser menor a 800 mg SSVL/L por ello es necesario estabilizar el inóculo aunque con los valores obtenidos hasta ahora se podría presumir que se alcanzará la concentración deseada ya que la diferencia es mínima.

Una vez transcurridas las 48 horas del proceso, la concentración de SSVL en el último compartimiento del reactor empezó a incrementar lo que se debe a la interacción del medio. La presencia de mosquitos, polvo, polen y basura afectó la calidad del agua.

La carga orgánica F/M se define como la cantidad de comida por unidad de biomasa que reciben diariamente los microorganismos.

Normalmente oscila entre 0,05 y 1,5 KgDQO/ KgSSVL.día (Orozco, 2005). Para este sistema la relación F/M es 0,143 KgDQO/KgSSVL.día, valor que entra en el rango adecuado para un sistema aerobio.

4.4. Determinación de las constantes cinéticas y estequiométricas

Las constantes cinéticas para la remoción de sustrato se obtuvieron en base a un balance de masa. Mientras que las constantes de producción de biomasa se obtuvieron a partir de la ecuación propuesta por Orozco (Anexo 4).

En la práctica, la concentración de la biomasa en un RFP opera como un RCM, de modo que se asume que los SSVL permanecen constantes a lo largo del reactor (Mara & Horan, 2003).

Las constantes cinéticas varían entre sí debido a las características del agua residual y del inóculo (Rojas, 2000). Los resultados obtenidos no se pueden comparar con otros valores ya que no se han realizado ensayos en este tipo de reactor biológico ni con el inóculo microbiano nativo I5 (Moncayo, 2010). En la Tabla 7 se observan las constantes obtenidas a partir de la experimentación en la planta piloto.

La experimentación con un RFP no ha sido materia de un estudio profundo, ya que la mayoría de los tratamientos de aguas residuales utilizan un RCM con su respectivo sedimentador (Orozco, 2005). La idea de incursionar en la investigación con un diseño diferente se debe a las características del inóculo microbiano nativo I5 (Moncayo, 2010). Al utilizar un RCM, el inóculo no tenía la capacidad de decantar y por ende se tendría que adicionar un floculante. Uno de los objetivos detrás de este proyecto es remediar el agua

contaminada de una manera amigable con el ambiente sin la adición de químicos ni sustancias nocivas.

La empresa “Textiles Tornasol” implementó un sistema de electrocoagulación para el tratamiento de sus aguas residuales que aún está en fase de prueba, por ello el agua electrocoagulada tiene una DQO alta. Sin embargo, el tratamiento biológico utilizando el inóculo microbiano nativo I5 (Moncayo, 2010) permitió reducir el DQO en dichas condiciones.

Aunque los resultados de esta investigación han logrado remover el DQO significativamente, aún no es suficiente para cumplir con la Normativa 203 del Municipio de Quito, en la cual se requiere un DQO menor a 292 mg/L para poder desechar el efluente a la alcantarilla (Moncayo, 2010).

El inóculo I5 (Moncayo, 2010) demostró que soporta cambios de pH y carga en un sistema de tratamiento tipo flujo pistón. Una de las aplicaciones de este inóculo es a nivel comercial. Se podría potenciar el uso de un inóculo nativo con la capacidad de remover DQO de aguas altamente contaminadas como es el caso de la industria textil.

Según Rojas (2000), la presencia de SSVL al final del tratamiento es aceptable si los niveles son menores a 1500 mg/L. Depende del tipo microorganismos y su procedencia si pueden éstos pueden o no llegar a afectar a los cuerpos receptores de agua y por ende al ambiente (Rodríguez *et al.*, 2006). En Ecuador sólo el 5% de empresas textiles manejan algún tipo de tratamiento para sus aguas residuales y de este bajo porcentaje se desconoce cuántas empresas manejan tratamientos biológicos (Moncayo, 2011). En base a estas investigaciones un inóculo para tratamiento biológico de aguas debería ser nativo para evitar alguna intervención en el ecosistema.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Se estableció el diseño y la puesta en marcha de una planta piloto para la remoción de DQO de aguas residuales de la industria textil, utilizando las características del inóculo microbiano nativo I5 (Moncayo, 2010).

La remoción de DQO del agua residual textil fue del 54% utilizando el inóculo microbiano nativo I5 (Moncayo, 2011) y las condiciones de operación del reactor.

El escalado se realizó progresivamente para permitir la adaptación de los microorganismos al medio de trabajo, es decir al agua residual electrocoagulada. El escalado se llevó a cabo en volúmenes de 6, 10 y 14 litros.

Con una concentración promedio de sólidos suspendidos volátiles presentes en licor mixto de 2806,6 mg SSVL/L se logró remover el DQO del agua residual. El efluente tratado mantuvo una concentración de 1290 mg SSVL/L, valor por debajo del límite establecido, logrando un efluente clarificado.

Se determinaron las constantes cinéticas de degradación de DQO, producción de biomasa y consumo de oxígeno en el RFP diseñado, simulando condiciones reales.

Las constantes cinéticas determinadas experimentalmente en reactor no pueden ser comparadas con otros estudios debido a que los datos existentes acerca de estas constantes se han determinado en RCM.

Debido a que la planta de electrocoagulación se encuentra en fase de prueba se comprobó que la combinación del tratamiento biológico con electrocoagulación aún no es efectiva para reducir la concentración de DQO a los niveles establecidos en la normativa 203 del Municipio de Quito.

CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

El inóculo nativo debe ser caracterizado para determinar qué tipo de microorganismos están involucrados en la remoción del contaminante con condiciones aerobias controladas y en condiciones reales de operación, incluyendo la interacción con el ambiente.

Se recomienda realizar escalados del inóculo nativo I5 (Moncayo, 2010) en volúmenes más pequeños con agua residual textil para determinar la relación exacta en la cual el inóculo tiene la mayor capacidad para degradar el DQO.

Con el fin de evitar la interacción del medio y preservar la naturaleza del inóculo, se recomienda realizar ensayos en un ambiente controlado para determinar el porcentaje exacto de remoción de contaminante que tiene el consorcio microbiano por sí solo. En base a éstas pruebas se determinará si el inóculo nativo I5 (Moncayo, 2010) por sí solo o con la interacción con el medio ambiente ha podido remover el DQO del agua residual textil.

Se considera importante estabilizar la biomasa en la planta piloto, en operación, para determinar la frecuencia y dosificación del inóculo.

En teoría un RFP es más eficiente que un RCM ya que la biomasa se traslada junto con el agua residual y promueve la remoción del contaminante. Sin embargo en la práctica la resistencia a los grandes cambios de concentración inicial (cargas abruptas) es baja, pues recae todo el trabajo sobre la biomasa del compartimiento inicial. En base a esta particularidad se propone un RFP con recirculación.

Se recomienda analizar los lodos para determinar la relación entre la tasa de utilización del sustrato y la edad de los lodos en un sistema con recirculación.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

Blanco, J. (2009). Degradación de un efluente real textil mediante procesos Fenton y Foto-Fenton. *Universidad Politécnica de Catalunya* .

Bornhardt, C., & Diez, M. (1998). Tratamiento Aeróbico de Efluentes Provenientes de la Industria de Tableros Prensados. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Sau Paulo.

CESAQ. (2010). *Centro de Servicios Ambientales y Químicos*. Quito.

Chen K., Wu, J.Y. y Hounq J. (1999). *Microbial decoloration of azo dyes by Proteu mirabilis*. *Journal of Industrial Microbiology & Biothechnology*.

García, A. (2011). *Evaluación de la capacidad de biorremoción de zinc en agua sintética de dos consorcios microbianos nativos, a escala de laboratorio*. Tesis de Ingeniería. Sangolquí.

Guevara, D. (2010). Biorremoción de cromo (cromo total y como VI) en agua sintética por dos inóculos bacterianos nativos compuestos a escala de laboratorio. Tesis de Ingeniería. Sangolquí.

Habibat, N. (2006). *Development of Biological Treatment System for Reduction of COD from Textile Waste Waster*. Malasia.

Hammer, M., & Hammer, J. (2008). *Water and Wastewater Tecnology*. Columbus: Pearson .

Horan, N. (1991). *Biological Wastewater Treatment Systems*. Chichester: Thomson Press.

Isik. (2004). Efficiency of simulated textile wastewater decolorization process based on the methanogenic activity of upflow anaerobic sludge blanket reactor in salt inhibition condition. *Enzyme & Microbial Technology* .

Mafla, X. (2010). Análisis y mejora de los procesos biológicos para la rehabilitación de la piscina de lodos activados (PLA) de la Refinería Estatal de Esmeraldas (REE). *Tesis de Ingeniería*. Sangolquí.

Mansilla, H., Lizama, C., Gutarra, A. y Rodríguez J (2001). *Tratamientos de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil*.

Mara, D., & Horan, N. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. London: Elsevier.

Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York: McGraw Hill International Editions.

Moncayo, I. (2010). *Remoción de los colorantes textiles reactivos rojo 141, amarillo 84 y azul navy 171 eliminados en el agua residual, utilizando un inóculo compuesto seleccionado, bajo condiciones anaerobias a nivel de laboratorio*. *Tesis de Ingeniería*. Sangolquí

Montenegro, J (2010). *Evaluación de la disminución de concentración de fenol en agua sintética por medio de dos consorcios bacterianos nativos. Aerobio y*

anaerobio facultativo, a nivel de laboratorio para su aplicación futura en la biorremediación de efluentes textiles. Tesis de Ingeniería. Sangolquí.

Nenerow, N. y Dasgupta, A. (1998) *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. U.K: Díaz de Santos

Ordoñez, P., & Mercado, I. (2007). Depuración de la materia orgánica. método de biodiscos vs. tratamiento de electrocoagulación. *Universidad Pontificie Bolivariana*.

Orozco. (2005). *Bioingeniería de Aguas Residuales*. Bogotá: Acodal.

Pandey, A., Singh, P., Lyergar, L. (2007). *Bacterial decolorized and degradation of azo dyes. International Biodeterioration & Biodegradation*

Pey, C. (2008). *Aplicación de Procesos de oxidación Avanzada para tratamiento y reutilización de efluentes textiles. Tesis de Ingeniería*. Valencia: Universidad de Valencia.

Recalde, C. (Octubre, 2009). Por una ley en defensa de la vida, en defensa del agua. *Voltairenet.org*

Reynolds, K. (2002). *Tratamiento de Aguas residuales en Latinoamérica*. Banco Mundial.

Reynolds, T., & Richards, P. (1996). *Unit Operations and Processess in Enviromental Engineering*. Boston: Thomson Publishing Inc.

Romero, J. (2000a). *Purificación del Agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romero, J. (2000b). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S. y Sanz, J (2006). *Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales*. Círculo de Innovación en tecnologías medioambientales y energía

Rodríguez, T., Pérez, E. y Vivas, E (2003). *Determinación de las constantes cinéticas y estequiométricas en un bioreactor de lodos activados convencional a escala*. (Laboratorio de aguas residuales de un frigorífico)

Sawyer, C. M. (2003). En *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. New York: McGraw-Hill.

Sen, S., & Demier, G. (2003). Anaerobic Treatment of Synthetic Textile Wastewater. *Journal of Enviromental Engineering* .

Toca, A. (1997). Industria Química y Cambio Tecnológico: El Proceso Electrolítico Solvay En Torrelavega. *Quaderns D'història De L'enginyeria* .

UA. (2009). Tratamiento de aguas residuales mediante tecnología electroquímica . *Universidad de Alicante* .

Witt, C. (23 de Agosto de 2008). 5% de las industrias cumple con normas ambientales. *El Telégrafo* , pág. 13.