



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN  
Y HUMEDAL PARA EL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA**

P R E S E N T A:

**ING. MARÍA GUADALUPE SALINAS JUÁREZ**

TUTORA:

**DRA. GABRIELA ELEONORA MOELLER CHÁVEZ**

2011



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Ma. Del Carmen Durán Domínguez  
Secretario: M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos  
Vocal: Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez  
1er. Suplente: Dr. Simón González Martínez  
2º. Suplente: M.I. José Luis Martínez Palacios

Lugar donde se realizó la tesis:

UNAM, Campus Morelos  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)  
Paseo Cuauhnáhuac 8532  
Col. Progreso  
Jiutepec, Morelos. México  
C.P.62550

**TUTOR DE TESIS:**

---

Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez

---

## AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco a:

- » La Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por la formación académica concedida
- » El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por la beca otorgada
- » El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, por el apoyo e infraestructura que hicieron posible este proyecto
- » Mi comité tutor:
  - « Dra. Gabriela E. Moeller Chávez, por su valiosa ayuda, paciencia, comprensión y por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo
  - « Dra. Ma. Del Carmen Durán Domínguez, por el tiempo que me dedicó, por todo su empeño en la mejora y terminación de esta tesis, por su asesoría en el Seminario de Investigación, por sus correcciones y valiosas aportaciones, por su ejemplo, por toda la enseñanza que recibí de su parte, no sólo académica, sino de formación profesional
  - « Dr. Simón González Martínez, por sus consejos, asesoría y contribución en la mejora de esta tesis.
- A los tres, mil gracias por ayudarme a culminar esta etapa
- » Los miembros de mi jurado: M.I. Esperanza Ramírez Camperos y M.I. José Luis Martínez Palacios, por sus comentarios y observaciones.
- » Mis profesores y a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron en la elaboración de esta tesis, en especial a José Cruz García Garduño, a la Dra. Rosa María Melgoza Alemán, al Dr. Marco A. Garzón Zúñiga, a la empresa textilera Rintex y al personal de teñido, a Lucero y a todos.
- » Mis compañeros y amigos:
  - « Liliana, por tu alegría y entusiasmo
  - « Rosa, por tu ánimo y valentía
  - « Yola, por tu ejemplo de dedicación y orden
  - « Almita, por tu confianza y por escucharme
  - « Artemisa, por tu compañía, y por el cúmulo de experiencias compartidas, ah, y por la buena comida
  - « Luis Gerardo, por todo el aprendizaje adquirido a tu lado, por los momentos de convivencia, por tus consejos, por ayudarme a visualizar un mundo de posibilidades sin límites, y por todo...

A todos, gracias por su amistad, desde los primeros días los admiré por su inteligencia y dedicación, sigamos buscando nuevos y mejores caminos...

- » Mis hermanos en Cristo, que siempre estuvieron pendientes de mí y que desde antes del inicio no me olvidaron en sus oraciones, en especial: gracias a Lulú, Lety y Lalo.
- » Mi familia por su comprensión y amor desde siempre, realmente son un hermoso regalo de Dios:
  - A mi mamá, por ser mi amiga, consejera y mi ejemplo a seguir
  - A mi papá por sus cuidados y atención
  - A Lucecita: gracias nena por todo, te quiero
  - A David y Jesús por su ayuda siempre que lo necesito,
  - A Lala y a mis tres pequeñines: Dany, Emmanuel y Chris, por esperar que cada vez vuelva
- » Al que da puro amor y todo lo puede, al principio sin principio, fin sin fin, al Dios bueno y perfecto, gracias por todos y por todo. Señor, tú lo sabes todo...

## Contenido general

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN .....   | 13 |
| ABSTRACT .....  | 15 |
| NOMENCLATURA .....  | 17 |
| Capítulo 1.....   | 19 |
| PROBLEMÁTICA .....  | 19 |
| 1.1    Introducción.....  | 19 |
| 1.2    Problema abordado.....   | 20 |
| 1.3    Objetivos .....  | 23 |
| 1.4    Alcances.....  | 23 |
| Capítulo 2.....   | 25 |
| FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....  | 25 |
| 2.1    Proceso de producción textil .....   | 25 |
| 2.2    Colorantes.....  | 28 |
| 2.2.1    Clasificación de los colorantes.....   | 29 |
| 2.2.2    Colorantes «azo».....  | 30 |
| 2.3    Tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales con<br>colorantes ..... | 31 |
| 2.4    Tecnologías combinadas .....   | 34 |
| 2.5    Biofiltros, biopelícula .....  | 35 |
| 2.6    Humedales.....   | 38 |
| 2.6.1    Humedales artificiales de flujo libre superficial.....                               | 42 |
| 2.6.2    Humedales artificiales de flujo sub-superficial .....                                | 43 |
| Capítulo 3.....   | 45 |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....  | 45 |
| 3.1    Agua residual a tratar .....   | 45 |
| 3.2    Selección de colorantes .....  | 49 |
| 3.3    Sistema experimental.....  | 49 |
| 3.3.1    Biofiltros .....   | 50 |
| 3.3.1.1    Materiales de empaque.....   | 50 |

|                             |   |    |
|-----------------------------|---|----|
| 3.3.1.2                     | Parámetros de operación .....   | 52 |
| 3.3.1.3                     | Montaje e inoculación de los biofiltros .....   | 53 |
| 3.3.2                       | Humedales artificiales, parámetros de operación .....   | 54 |
| 3.4                         | Operación y seguimiento del sistema experimental .....  | 56 |
| 3.4.1                       | Arranque .....  | 56 |
| 3.4.2                       | Operación .....   | 56 |
| 3.5                         | Diseño experimental.....  | 57 |
| 3.6                         | Análisis estadístico.....   | 58 |
| Capítulo 4.....             |   | 59 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... |   | 59 |
| 4.1                         | Caracterización de las aguas residuales en estudio .....  | 59 |
| 4.2                         | Desempeño de los sistemas .....   | 62 |
| 4.2.1                       | Módulo I: Agua residual de medio blanqueo .....   | 64 |
| 4.2.1.1                     | Parámetros de campo (pH, temperatura, CE y SDT) .....   | 64 |
| 4.2.1.2                     | DQO .....   | 64 |
| 4.2.1.3                     | N <sub>T</sub> y N-NH <sub>4</sub> .....  | 67 |
| 4.2.2                       | Módulo II: Agua residual de baño de teñido.....   | 67 |
| 4.2.2.1                     | Parámetros de campo .....   | 67 |
| 4.2.2.2                     | DQO .....   | 67 |
| 4.2.2.3                     | Concentración de colorante.....   | 71 |
| 4.2.2.4                     | Color aparente y color verdadero .....  | 74 |
| 4.2.2.5                     | N <sub>T</sub> y N-NH <sub>4</sub> .....  | 77 |
| 4.2.3                       | Módulo III: mezcla de aguas residuales: sanitaria con<br>agua de medio blanqueo y de colorantes ..... | 77 |
| 4.2.3.1                     | Parámetros de campo .....   | 77 |
| 4.2.3.2                     | DQO .....   | 79 |
| 4.2.3.3                     | Concentración de colorante.....   | 80 |
| 4.2.3.4                     | Color aparente y color verdadero .....  | 84 |
| 4.2.3.5                     | N <sub>T</sub> y N-NH <sub>4</sub> .....  | 86 |
| 4.3                         | Discusión final .....   | 86 |
| Capítulo 5.....             |   | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                             | 93  |
| 5.1 Conclusiones.....  | 93  |
| 5.1.1 Módulo I (agua de medio blanqueo): .....                   | 94  |
| 5.1.2 Módulo II (agua del baño de teñido): .....                 | 94  |
| 5.1.3 Módulo III (mezcla del agua de blanqueo y colorante):..... | 94  |
| 5.2 Recomendaciones.....   | 95  |
| ANEXO A .....  | 97  |
| A.1 .....  | 97  |
| A.2 .....  | 99  |
| ANEXO B.....   | 117 |
| BIBLIOGRAFÍA .....   | 136 |

## Lista de figuras

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 2.1 | Descarga de agua residual en un proceso de teñido de una industria cooperante   | 27 |
| Figura 2.2 | Estructura del cromóforo azo .....  | 31 |
| Figura 2.3 | Mecanismo del proceso de degradación de los colorantes azo y aminas aromáticas durante un tratamiento aerobio y anaerobio ..... | 33 |
| Figura 2.4 | Principio de operación de un biofiltro .....  | 37 |
| Figura 2.5 | Humedal artificial de flujo libre superficial .....   | 42 |
| Figura 2.6 | Humedal artificial de flujo sub-superficial vertical .....  | 44 |
| Figura 2.7 | Humedal artificial de flujo sub-superficial horizontal .....  | 44 |
| Figura 3.1 | Etapas de medio blanqueo en el proceso de teñido para algodón en color "Black Jack 1491" de la empresa cooperante .....         | 47 |
| Figura 3.2 | Obtención del baño de teñido en la tinción de algodón en color "Black Jack 1491" de la empresa cooperante .....                 | 48 |
| Figura 3.3 | Esquema del sistema experimental .....  | 50 |
| Figura 3.4 | Biofiltro utilizado .....   | 51 |
| Figura 3.5 | Diagrama esquemático del reactor empacado tipo humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial empleado .....            | 54 |
| Figura 3.6 | Biofiltros en operación .....   | 55 |
| Figura 3.7 | Humedales artificiales en operación .....   | 55 |
| Figura 4.1 | Corte del humedal artificial utilizado con sifón .....  | 65 |



## Lista de tablas

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabla 2.1 | Consumo de agua según material textil y equipo de teñido .....                                      | 28 |
| Tabla 2.2 | Ventajas y desventajas de los humedales artificiales .....  | 41 |
| Tabla 3.1 | Aditivos incluidos en el agua residual de medio blanqueo y sus respectivas concentraciones .....    | 46 |
| Tabla 3.2 | Colorantes incluidos en el agua residual del baño de teñido y sus respectivas concentraciones ..... | 47 |
| Tabla 3.3 | Densidad de los materiales del biofiltro .....  | 52 |
| Tabla 3.4 | Puntos de muestreo de los sistemas .....  | 56 |
| Tabla 3.5 | Parámetros de seguimiento .....   | 57 |
| Tabla 3.6 | Diseño experimental .....   | 58 |
| Tabla 4.1 | Parámetros físico-químicos de los efluentes en estudio .....  | 60 |
| Tabla 4.2 | Características de las aguas residuales en estudio (influyente) .....                               | 61 |
| Tabla 4.3 | Resumen del desempeño de los sistemas .....   | 63 |
| Tabla 4.4 | Parámetros de campo (módulo I) .....  | 64 |
| Tabla 4.5 | Parámetros de campo (módulo II) .....   | 67 |
| Tabla 4.6 | Parámetros de campo (módulo III) .....  | 77 |
| Tabla 4.7 | Desempeño alcanzado en cada módulo .....  | 88 |

## Lista de gráficas

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gráfica 4.1  | Concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo I para la dilución de agua medio blanqueo con AR municipal (mg/L)      | 66 |
| Gráfica 4.2  | Remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo I; para la dilución de agua de medio blanqueo con AR municipal (%)          | 66 |
| Gráfica 4.3a | Comportamiento de nitrógeno total y amoniacal en los sistemas del módulo I para la dilución de agua de medio blanqueo con AR municipal (mg/L) | 68 |
| Gráfica 4.3b | Comportamiento de nitrógeno total y amoniacal en los sistemas del módulo I para la dilución de agua de medio blanqueo con AR municipal (mg/L) | 69 |
| Gráfica 4.4  | Concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo II; para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L) | 70 |
| Gráfica 4.5  | Remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo II; para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)         | 70 |
| Gráfica 4.6  | Concentración de colorante Negro Ciba R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)                    | 71 |
| Gráfica 4.7  | Remoción de concentración del colorante Negro Ciba R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)          | 72 |
| Gráfica 4.8  | Concentración del colorante Negro Ciba R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)                   | 72 |
| Gráfica 4.9  | Remoción de la concentración del colorante Negro Ciba G en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)       | 73 |
| Gráfica 4.10 | Concentración del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)              | 73 |
| Gráfica 4.11 | Remoción de la concentración del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)  | 74 |
| Gráfica 4.12 | Color medido como color aparente en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (U Pt/Co)                        | 75 |
| Gráfica 4.13 | Remoción de color medido como color aparente en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)                  | 75 |
| Gráfica 4.14 | Color medido como color verdadero en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (U Pt/Co)                       | 76 |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Gráfica 4.15 | Remoción de color medido como color verdadero en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%) .....  | 76 |
| Gráfica 4.16 | Comportamiento de nitrógeno total y amoniacal en los sistemas del módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L) .....                                   | 78 |
| Gráfica 4.17 | Concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L) .....          | 79 |
| Gráfica 4.18 | Remoción de concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%) ..... | 80 |
| Gráfica 4.19 | Concentración del colorante Negro Ciba R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo, y agua de baño de teñido (mg/L) .....                          | 81 |
| Gráfica 4.20 | Remoción de concentración del colorante Negro Ciba R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L) .....               | 81 |
| Gráfica 4.21 | Concentración del colorante Negro Ciba G en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo, y agua de baño de teñido (mg/L) .....                          | 82 |
| Gráfica 4.22 | Remoción de concentración del colorante Negro Ciba G en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, agua de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%) .....             | 82 |
| Gráfica 4.23 | Concentración del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, agua de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L) .....                 | 83 |
| Gráfica 4.24 | Remoción de concentración del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%) .....             | 83 |
| Gráfica 4.25 | Color medido como color aparente en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (U Pt/Co) .....                                | 84 |
| Gráfica 4.26 | Remoción de color medido como color aparente en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%) .....                          | 85 |
| Gráfica 4.27 | Color medido como color verdadero en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (U Pt/Co) .....                               | 85 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gráfica 4.28 | Remoción de color medido como color verdadero en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%) .....                  | 86 |
| Gráfica 4.29 | Comportamiento de nitrógeno total y amoniacal en los sistemas del módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L) ..... | 87 |

---

## RESUMEN

---

Los colorantes “azo” se encuentran entre los más utilizados en los procesos de teñido de la industria textil y son considerados como sustancias carcinógenas y recalcitrantes. Las sustancias químicas empleadas en el proceso de teñido, distintas a los colorantes, se les llama aditivos o auxiliares y proporcionan en su conjunto un grado de contaminación importante a las aguas residuales que las contienen. Los humedales artificiales así como el sistema de biofiltración se utilizan para el tratamiento de aguas residuales de este tipo de industrias. El presente estudio evalúa a nivel de laboratorio los sistemas de biofiltración anaerobia, un humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial y la combinación de ambos para el tratamiento de un efluente textil. El sistema experimental se conformó por tres módulos. Cada módulo evaluó el efluente de tres líneas de tratamiento: la primera constituida por un biofiltro anaerobio –empacado con lecho orgánico – ; la segunda, por el efluente obtenido del mismo biofiltro seguido por un humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial (HAFH) y la tercera conformado únicamente por un HAFH; todas éstas alimentadas con agua residual del mismo tipo. El seguimiento del sistema consistió en la evaluación analítica del efluente de cada línea de tratamiento: biofiltro, biofiltro-HAFH y HAFH (para cada módulo). Los biofiltros fabricados en acrílico con una capacidad volumétrica de 4.5 L, fueron empacados con una mezcla de 50% de turba y 50% de trozos de madera de tabachín (*Caesalpinia pulcherrima*). Los sistemas de humedales artificiales utilizados se empacaron con tezontle y grava, en los que se plantaron tres ejemplares de la especie vegetal conocida como “Cuna de Moisés” (*Spathiphyllum wallisii*). Se utilizó agua

residual proveniente de una empresa textil que fabrica playeras de algodón, ubicada en el Municipio de Jiutepec, Morelos, México. Se emplearon tres tipos de agua residual, uno para cada módulo. En el módulo I se empleó agua con aditivos, en el módulo II agua con colorantes y en el módulo III una mezcla de agua residual con aditivos y con colorantes, simulando el efluente real del proceso de teñido. Para la evaluación de los sistemas de tratamiento se analizó el comportamiento de los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno, concentración de color, color aparente y color verdadero. El sistema de biofiltración fue el que mejor desempeño tuvo en relación con los contaminantes medidos como DQO y color, con remociones del 94% de DQO en el módulo I (en este módulo no hubo adición de colorantes); en el módulo II se alcanzaron remociones de: 58% de DQO, 62% de concentración de color y 62% de color verdadero; en el módulo III, se obtuvieron las remociones más bajas: 45% de DQO, 22% de concentración de color y 14% de color verdadero. El sistema menos eficiente fue el HAFH. La combinación de biofiltración y humedal comparado con el sistema de biofiltro no tiene diferencia significativa. Con todo lo anterior se concluyó que para un mejor tratamiento de este tipo de efluentes, es recomendable la separación de los dos tipos de agua que se desechan en la industria textil, pues al mezclarlas en la descarga, los sistemas de tratamiento presentan eficiencias menores.

**Palabras clave:** Colorante azo, humedales artificiales, biofiltración, color, remoción de materia orgánica

---

## ABSTRACT

---

Azo dyes are the most common compounds used in the dyeing process in textile industry and are considered carcinogenic and recalcitrant compounds. The chemical substances used in the dyeing process are the additives or auxiliary substances, these substances contribute in an important degree to pollution of wastewater that contains them. Constructed wetlands as well as biofilter system are used for wastewater treatment of this type of industry. In this research, anaerobic biofiltration, constructed wetlands and a coupled system using both technologies and fed with a textile effluent in a lab scale, were studied. Three modules were used. Each module evaluates the effluent of three different treatment lines: The first, constituted by an anaerobic biofilter packed with organic material; the second, by the effluent from the same biofilter, coupled to a horizontal flow subsurface constructed wetland (HFS), and, the third constituted by a HFS constructed wetland; every line was fed with wastewater of the same type. The performance of the effluent from each treatment line: biofilter, biofilter-HFS constructed wetland and HFS constructed wetland were followed. Biofilters were made of acrylic with a volume of 4.5 L. They were packed with a mixture of 50% peat and 50% wood chips from a vegetal specie named “tabachín” (*Caesalpinia pulcherrima*). The constructed wetland systems were packed with crushed rock “tezontle” and gravel, planted with three specimens of a vegetal specie named “Cuna de Moisés” (*Spathiphyllum wallisii*). Wastewater from a textile company, located in

Jiutepec Morelos, Mexico, was used. Three different kinds of wastewater were employed, one for each module. In module 1 the wastewater was fed with a mixture of additives used in the textile production process. Wastewater with dyes was used in module 2; and module 3 was fed with wastewater made with a mixture of additives and dyes. Chemical oxygen demand (COD), color concentration, apparent color and true color were measured for the evaluation of the treatment systems used. In this study, for module 1, the biofiltration system had the best performance organic matter, measured as COD, was efficiently removed (94%). In module II, removals obtained were 58% for COD, 62% for color concentration and 62% for true color. For module III, removals were 45% for COD, 22% for color concentration and 14% for true color. The HFS constructed wetland systems had the lower performance. Then, for a better treatment of this type of effluents, it's recommended to separate the two different effluents from the dyeing process because their mixture affects negatively the systems diminishing their performance.

**Keywords:** Azo dye, constructed wetlands, biofiltration, color, organic matter removal



---

## NOMENCLATURA

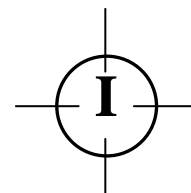
---

|                |   |
|----------------|---|
| ANDEVA         | Análisis de varianza  |
| ANOVA          | Análisis de varianza, por sus siglas en inglés                              |
| AR             | Agua residual   |
| CE             | Conductividad eléctrica   |
| CM             | Cuadrado medio  |
| COT            | Carbono orgánico total  |
| CONACYT        | Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología                                    |
| CONAGUA        | Comisión Nacional del Agua  |
| CSTR           | Reactor continuo de tanque agitado, por sus siglas en inglés                |
| d              | Días  |
| DBO            | Demanda biológica de oxígeno, mg/L  |
| DCA            | Diseño completamente al azar  |
| DQO            | Demanda química de oxígeno, mg/L  |
| EDTA           | Ácido etilendiaminotetraacético   |
| EPA            | Environmental Protection Agency de los Estados Unidos, por su nombre inglés |
| F <sub>o</sub> | Estadístico de prueba   |
| F <sub>T</sub> | Significancia observada   |
| FV             | Fuente de variabilidad  |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| GL                             | Grados de libertad  |
| HF                             | Flujo horizontal  |
| HAFLS                          | Humedal artificial de flujo libre superficial             |
| HAFH                           | Humedal artificial de flujo horizontal                    |
| HAFS                           | Humedal artificial de flujo sub- superficial              |
| IMTA                           | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua                 |
| LSD                            | Diferencia mínima significativa, por sus siglas en inglés |
| Mezcla AR                      | Mezcla de aguas residuales                                |
| n                              | Número de datos por tratamiento                           |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Nitrógeno amoniacal                                       |
| N <sub>T</sub>                 | Nitrógeno total   |
| RA                             | Rojo ácido  |
| Rp                             | Rango de significancia mínima                             |
| SBR                            | Reactor discontinuo secuencial, por sus siglas en inglés  |
| SC                             | Suma de cuadrados   |
| SDT                            | Sólidos disueltos totales                                 |
| SST                            | Sólidos suspendidos totales                               |
| TRH                            | Tiempo de residencia hidráulica                           |
| VF                             | Flujo vertical  |

### **Letras griegas**

|          |                        |
|----------|------------------------|
| $\alpha$ | Nivel de significancia |
| $\mu$    | Datos experimentales   |



---

# PROBLEMÁTICA

---

## 1.1 Introducción

La industria textil se desarrolló a lo largo de los siglos, evolucionando en diferentes etapas en las que, de ser una artesanía, se convierte en una de las más grandes industrias en el mundo.

En los sistemas de manufactura de productos textiles las operaciones unitarias utilizan diversas materias primas como algodón, lana, fibras sintéticas o mezclas de ellas (Mansilla *et al.* 2002) y el teñido (fijación de moléculas de material colorante en las fibras) es la operación más compleja de todo el procesamiento húmedo siendo en la que se emplea la mayor cantidad de agua.

Considerando el problema de contaminación del agua, la industria textil debe hacer más eficientes sus procesos de producción para hacer un mejor uso de este recurso. Para realizar un buen aprovechamiento y uso racional del agua en la industria textil se requiere sustituir o cambiar materias primas, usar equipo de proceso más eficiente y utilizar agua tratada en servicios y procesos donde la calidad del agua requerida sea menos estricta.

Los colorantes textiles tienen gran persistencia en el ambiente, y afectan química y estéticamente los cuerpos de agua en donde son descargados.

Una gran proporción de los colorantes no son directamente tóxicos para los organismos vivos; sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cuerpos de agua, haciendo necesario que su presencia sea controlada.

Los métodos típicos para la eliminación del agua residual, no son eficientes debido a que oxidaciones o reducciones parciales de estas sustancias pueden generar productos secundarios altamente tóxicos.

Por tal motivo, se han realizado diversas investigaciones en torno a la remoción de color y toxicidad en el agua residual originada por el uso de colorantes en la industria textil. Las investigaciones se han encaminado utilizando una variedad de procedimientos, tanto físicos y químicos como biológicos y combinados, en busca una solución óptima para el tratamiento de este tipo de efluentes y evitar que continúe el deterioro de los cuerpos de agua que reciben los caudales coloreados continúe.

Los sistemas biológicos son una alternativa viable en cuanto a costo y facilidad de operación en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Los estudios efectuados aplicando este tipo de tecnologías a aguas residuales de la industria textil han revelado su efectividad en el tratamiento. En el presente estudio se investiga el desempeño de un sistema biológico acoplado para el tratamiento del agua residual industrial textil, empleando un sistema en secuencia compuesto por un régimen de biofiltración anaerobia sobre lecho orgánico y un reactor que simula humedales artificiales. Tales sistemas se estudian asimismo de manera individual para observar su eficiencia así como el comportamiento de los principales contaminantes contenidos en el agua residual en cada sistema.

## **1.2 Problema abordado**

La industria textil es generadora de millones de metros cúbicos de agua residual anualmente. Los contaminantes más importantes en efluentes textiles son principalmente

compuestos recalcitrantes orgánicos como colorantes, sustancias tóxicas y compuestos inhibitorios, surfactantes y sales que, en conjunto conducen a valores extremos de pH (Şen y Demirer, 2003). Igualmente se encuentran en estos efluentes contaminantes inorgánicos tales como metales, cloro, sulfatos, sulfuros y nitrógeno (Bulc y Ojstršek, 2008), lo que hace necesario su tratamiento antes de descargarlos a los cuerpos de agua.

Una consideración muy importante, es la alteración que puede sufrir la estructura química de los contaminantes presentes en el agua residual textil, originando nuevos compuestos xenobióticos y que éstos puedan ser más tóxicos que los componentes originales del agua residual (Vijaya y Sandhya, 2003).

En procesos típicos de teñido y estampado, de 50 a 100% de color se fija a la fibra; el resto es desechado en forma de baños gastados de colorante o en el agua residual de operaciones subsecuentes de lavado. Algunos pigmentos y tintes son considerados por la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), como residuos peligrosos. Entre éstos se encuentran los colorantes tipo azo, que son de uso general en la tinción de textiles (United States Environmental Protection Agency, en adelante, EPA, 1997).

La descarga de colorantes azo al medio ambiente a través del agua residual en grandes proporciones, implica un alto riesgo a la salud humana y al ecosistema debido a que algunos de estos colorantes o sus subproductos son altamente tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos (Kalyuzhny y Skylar, 1999).

Los procesos de la industria textil no liberan grandes cantidades de metales; sin embargo, aún las pequeñas concentraciones contenidas en los colorantes producen acumulación en los tejidos de animales acuáticos. Muchas veces los efectos se observan a largo plazo y, en la mayoría de los casos, son dañinos y costosos de tratar. Las descargas pueden aumentar la población de peces y algas debido a su alto contenido de nitrógeno y así, se agota el contenido del oxígeno disuelto en el agua.

Los nuevos colorantes se caracterizan por su resistencia a la luz, al lavado, y al ataque microbiano, lo que los hace atractivos y funcionales a la industria pero dan lugar a

compuestos más recalcitrantes (Michaels y Lewis, 1986; Razo-Flores, 1997). Éste es el caso de colorantes con sustituciones en las moléculas de sus grupos funcionales, tales como azo, nitro y grupos sulfo (Pagga y Brown, 1986).

Otros motivos por los que el agua residual textil causa problemas en el ambiente son:

- Los colorantes absorben y reflejan la luz solar, lo cual interfiere con el crecimiento microbiano, ocasionando una disminución en la autopurificación de los cuerpos de agua contaminados. Altas dosis de color puede interferir en la fotosíntesis y en la vida acuática (Pagga y Brown, 1986).
- Los colorantes debido a su complicada estructura, tienen una relación  $DBO_5^1/DQO$  baja, indicando la naturaleza no biodegradable de estos compuestos, lo cual complica el tratamiento de las aguas residuales que los contienen (Hao et al., 2000).

El agua residual que contiene colorantes textiles es una de las aguas residuales industriales más difíciles de tratar (Kim et al., 2004; Tantak y Chaudhari, 2006) y, dado su carácter mutagénico y carcinógeno, es necesario encontrar un tratamiento adecuado para degradar estos contaminantes.

La importancia comercial, el impacto y toxicidad de los colorantes que son liberados en el ambiente, ha motivado a investigadores, en diferentes partes del mundo, a estudiarlos, de tal forma que se han aplicado diversos métodos en la investigación para su tratamiento.

Distintos métodos físicos, químicos y biológicos pueden ser aplicados a la remoción de colorantes contenidos en el agua residual. La mayoría de los métodos físico-químicos para la remoción de colorantes tienen limitada versatilidad y encuentran grandes interferencias por otros constituyentes del agua residual, generando subproductos que requieren un

---

<sup>1</sup> Las demandas bioquímica y química de oxígeno, DBO y DQO, son dos formas indirectas de medir el contenido de compuestos presentes en una muestra de agua residual. La primera, la  $DBO_5$ , fue desarrollada en Inglaterra para medir el grado de contaminación del río Támesis, que tardaba 5 días en desembocar desde Londres en el mar del Norte y, por ello, es que la determinación en el laboratorio se hizo a 5 días. Actualmente se realiza la llamada  $DBO_5$ , que es cuando ya no hay material biodegradable metabolizable en la muestra en estudio. En el presente estudio se utiliza la nomenclatura DBO con el entendido de que se refiere al análisis con una incubación de 5 días, a menos que se indique de otra forma. La relación  $DBO/DQO$  puede ir de 0 a 1, para compuestos recalcitrantes al tratamiento biológico el primer valor y para los completamente biodegradables el segundo

manejo adecuado. Alternativamente, el tratamiento biológico presenta una forma relativamente económica y efectiva para remover colorantes del agua residual (Van der Zee y Villaverde, 2005).

## **1.3 Objetivos**

### **Objetivo general**

- ✓ Evaluar el desempeño de un biofiltro anaerobio, un humedal artificial y su combinación a nivel de laboratorio para el tratamiento de efluentes de la industria textil que contienen colorantes tipo azo.

### **Objetivos específicos**

- ✓ Evaluar la degradación de los colorantes y compuestos químicos de dos tipos de agua residual y su mezcla provenientes de una industria textil en los sistemas de biofiltración anaerobia, humedal artificial, en forma individual y utilizando la combinación de ambos sistemas
- ✓ Evaluar cada uno de los sistemas con base en la eliminación de contaminantes disueltos como DQO y color
- ✓ Determinar cuál es el sistema de tratamiento más eficiente para la remoción de contaminantes disueltos y color, ya sea en combinación o de forma individual

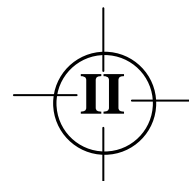
## **1.4 Alcances**

- ✓ Construir a nivel de laboratorio el sistema experimental consistente en tres módulos (módulo I, II y III)
- ✓ Alimentar el sistema experimental con agua residual textil real, proveniente de una industria textil (maquiladora de playeras de algodón). Este tipo de agua residual

presenta considerables variaciones en las cargas de materia orgánica y contaminantes

- ✓ Dar seguimiento al experimento en los tres módulos y a temperatura ambiente





---

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

### 2.1 Proceso de producción textil

La industria textil fabrica tejidos de todo tipo, a partir de fibras naturales y/o sintéticas, así como prendas derivadas de las fibras producidas. Los procesos implicados en la producción varían según cada producto textil. La primera etapa en la fabricación de textiles implica la producción de la materia prima, ya sea de origen vegetal, animal o químico; a continuación, la fibra se hila y posteriormente se usa para tejer las telas. Después del teñido y el acabado de los tejidos hilados, el material se suministra directamente para la confección de prendas de vestir o ropa de casa.

Cada clase de fibra se comporta de manera diferente, por lo que es necesario darle un tratamiento especial a cada una; para hacerlo existen diferentes tipos de máquinas, colorantes, productos o sustancias auxiliares, etc.

Las operaciones efectuadas en la industria textil se engloban en dos etapas que incluyen distintos procesos. Las 2 etapas principales son: hilatura-tejido de la fibra y el acabado. El acabado es la última fase del tratamiento al que se someten los tejidos con el fin de darles

una mejor presentación; en esta etapa se les confieren ciertas características especiales como la suavidad, opacidad, lubricidad, etc.

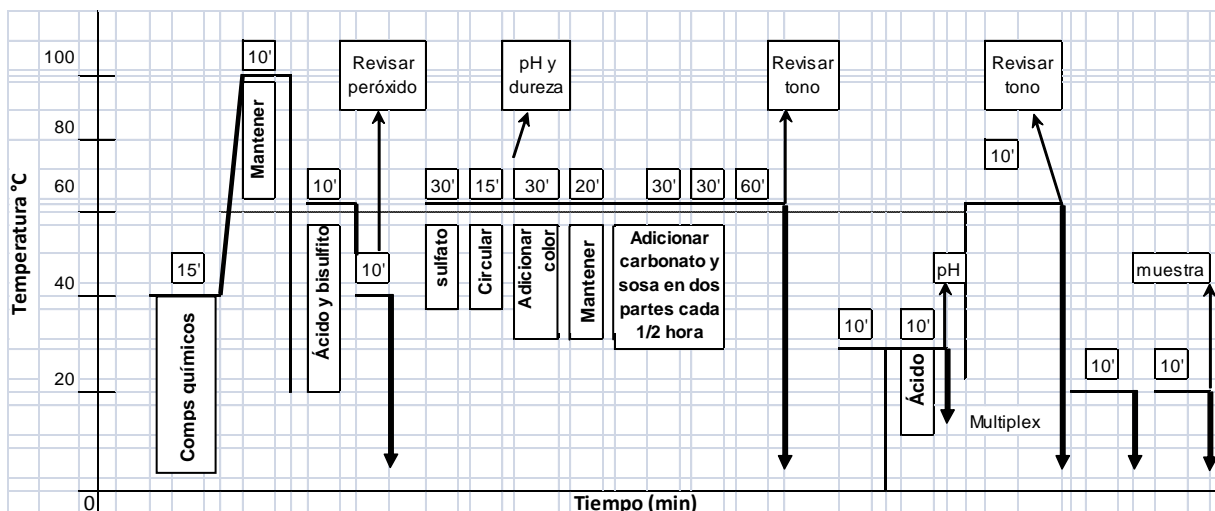
Durante la fase de acabado intervienen los procesos de: medio blanqueo, teñido-blanqueo y el acabado. Durante el medio blanqueo se da un pre-tratamiento a las fibras, por medio del cual se desea disponer la tela para un teñido adecuado eliminando toda la basura o suciedad que contiene la fibra cruda; en esta etapa se procuran las condiciones óptimas para lograr las coloraciones esperadas en las telas durante el teñido. Por último, con el acabado se acondiciona la fibra, de tal forma que queda como producto final la tela para llevarla a confección. La mayor cantidad de agua empleada por la industria textil es aplicada en estas etapas, en donde se adicionan la mayor cantidad de agentes químicos y sustancias que posteriormente se convierten en fuertes contaminantes, como las aminas.

La **Figura 2.1** muestra las etapas del proceso de teñido de la empresa “Gamatex, S.A. de C.V.”, en donde se indican las descargas de agua residual, considerando que en cada etapa se utilizan desde 3000 hasta 20000 litros de agua, de acuerdo con la cantidad y tipo de fibra a teñir.

Cada flecha dirigida hacia abajo indica una descarga de agua residual, lo que representa seis descargas de 3000 L de agua para este caso, donde se procesan 420 kg de tela, es decir, se emplea un aproximado de 50 L/kg de fibra (Ing. Jesús M. Bombela, 2007, comunicación personal). Los números encerrados en un recuadro indican el tiempo en minutos que dura el proceso en cada etapa.

Asimismo se muestran los productos que se adicionan en cada tiempo y a qué temperatura, proporcionando una idea de las posibles sustancias contenidas en el agua residual en cada descarga, además de la temperatura de cada efluente.

Es importante mencionar que si al momento de revisar el tono, éste no cumple con lo requerido, será necesario repetir el proceso hasta obtener el tono deseado



**Figura 2.1** Descargas de agua residual en un proceso de teñido de la industria “Textiles Gamatex S.A. de C.V.” (Ing. Jesús M. Bombela, 2007, Gamatex S.A. de C.V., comunicación personal)

La constitución del agua residual del proceso de teñido depende en gran medida de la constante variación de los sustratos teñidos, de los colorantes, de los productos auxiliares textiles y de los compuestos químicos empleados, por lo cual es difícil lograr que los efluentes generados estén dentro de los valores límite de descarga según la normativa<sup>2</sup> (en México la normativa no regula el color). Generalmente, el agua residual del teñido y acabado sin tratar tiene un pH alcalino, una elevada temperatura, alta conductividad eléctrica (en adelante CE) y una pobre relación de DBO/DQO comparada con el agua residual doméstica.

En los efluentes se pueden encontrar sales, almidón, peróxidos, EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), tensoactivos, enzimas, colorantes, metales y otros compuestos orgánicos de variada estructura química, que provienen de las distintas etapas del proceso global (Ing. Guillermo Rivas-De-León, 2009, Rintex S.A. de C.V., comunicación personal<sup>3</sup>).

<sup>2</sup> Normativa según: NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales  
 NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal

<sup>3</sup> Ing. Guillermo Rivas-De-León, 2009, Rintex S.A. de C.V., empresa textil maquiladora de playeras, Michoacán México (playera es el nombre que se da en México a camisetas de algodón usadas sin camisa)

La cantidad de agua empleada en los procesos textiles cambia en forma considerable. Por ejemplo, en el teñido con colorantes dispersos, se utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto. En la tinción con colorantes reactivos, las cifras varían entre 125 y 170 litros por kilogramo de producto (EPA, 1997)

Los resultados de una serie de mediciones de las cantidades de consumo de agua requerida en términos del material textil y del equipo de teñido se presentan en la **Tabla 2.1**.

**Tabla 2.1** Consumo de agua según material textil y equipo de teñido  
(incluye pre-tratamiento)

| <b>Textiles</b>    | <b>Consumo m<sup>3</sup>/ton de material</b> |
|--------------------|--|
| Telas de algodón   | 80 – 240                                     |
| Tejidos de algodón | 70 – 180                                     |
| Telas de lana      | 100 – 250                                    |
| Telas de poliéster | 10 – 70                                      |

Fuente: Comisión Ambiental Metropolitana, 1999

## 2.2 Colorantes

La Asociación Ecológica y Toxicológica de la Industria de Colorantes en EEUU, *ETAD*<sup>4</sup> (por sus siglas en inglés), define a los colorantes como sustancias orgánicas fluorescentes o de color intenso las cuales imparten color a un sustrato por medio de una absorción selectiva de la luz.

El color de los compuestos orgánicos depende de su estructura química. La característica del color es especialmente notable en productos químicos que contienen ciertos grupos insaturados definidos. Estos productos químicos, conocidos como cromóforos (portadores de color), tienen diferentes capacidades para dar color. Por lo tanto, las moléculas de colorante contienen en su estructura uno o más grupos cromóforos. De entre los cromóforos principales, el cromóforo azo (fenilazobenceno) y el de antraquinona son los más comunes.

<sup>4</sup> [www.etad.com](http://www.etad.com)

Los colorantes tienen la capacidad de penetrar y colorear los tejidos y otros materiales. Los radicales químicos llamados auxocromos, tienen la propiedad de fijar eficazmente el colorante deseado. Se trata de ácidos y bases que originan colorantes ácidos y básicos. En algunos compuestos, la presencia de un grupo auxocromo puede colorear compuestos incoloros, pues se ha visto que el color de un colorante y su intensidad pueden ser modificados por la introducción de auxocromos en la molécula (Hao et al., 2000). Los colorantes tienen generalmente una estructura química complicada que se logra mediante reacciones con componentes que se conocen como productos intermedios.

El teñido textil se refiere a los compuestos orgánicos (colorantes) que se pueden disolver en solventes apropiados, generalmente agua. Los tintes en la solución de teñido son absorbidos por difusión en la superficie de la fibra después del paso del textil por el interior de la solución.

### **2.2.1 Clasificación de los colorantes**

Existe una gran variedad de colorantes sintéticos, siendo éstos los más usados en la industria textil. Los colorantes pueden clasificarse atendiendo a sus aplicaciones o por su estructura química. La clasificación química suele determinarse por el núcleo del compuesto. Por su estructura, se tienen los colorantes del tipo: azo, antraquinonas, talocianinas, y del trifenilmetano, entre otros (Kirk-Othmer, 1993).

La principal fuente de contaminación de los efluentes textiles está constituida por la presencia de colorantes azo, que tiene mayor presencia comercial y son difíciles de degradar por los sistemas de tratamiento de tipo convencional.

Las clases de colorantes comúnmente usados en la industria textil incluyen ácidos, básicos, directos, dispersos, mordentes, reactivos, sulfurados, azoicos y colorantes de tina. Cada tipo de colorante, dependiendo de su estructura química, presenta características físicas, químicas y biológicas diferentes, que les atribuyen propiedades recalcitrantes y efectos tóxicos para el ambiente. Su presencia en el agua residual textil aún en bajas concentraciones es muy visible e indeseable (O'Neill et al., 1999).

El mecanismo de transferir el tinte de la solución a la fibra se llama agotamiento. Con 100% del agotamiento significa que no hay tinte fuera de la solución del baño. La concentración de colorantes en el agua residual de la industria textil se debe a que durante el proceso de acabado de telas e hilos, particularmente durante el teñido, el colorante no es fijado completamente, quedando una cantidad residual que varía usualmente desde el 12 hasta el 50% de la concentración de colorante usada, dependiendo del tipo de colorante y del proceso usado para su fijación. Este componente residual es el que se incorpora a las aguas superficiales (Rajaguru *et al.*, 2000). De acuerdo con O'Neill *et al.* (1999) y la EPA(1996), los colorantes reactivos tienen el más bajo porcentaje de fijación que va de un 90 a un 50%, mientras que los que mejor se fijan son los colorantes básicos logrando una fijación del 97 al 98%.

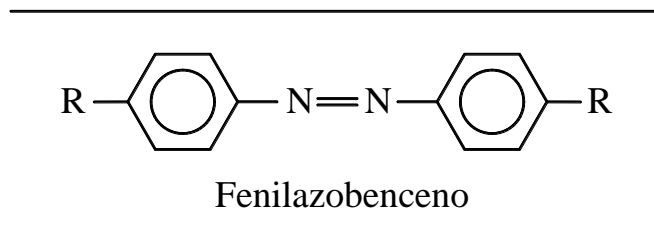
## 2.2.2 Colorantes «azo»

Los colorantes «azo» usados en la industria son compuestos xenobióticos. La recalcitrancia de los colorantes azo produce una severa contaminación en los ríos y en el agua subterránea que los recibe (Riu *et al.*, 1998).

Los azo son el grupo de colorantes más ampliamente usado en la industria textil, alimentaria, cosmética y farmacéutica (Razo-Flores, 1997; Zhang *et al.*, 1995). Los colorantes azo representan más del 70% de los colorantes textiles producidos y son el cromóforo más común de los colorantes reactivos (Carliell *et al.*, 1995).

Los colorantes tipo azo están caracterizados por estar unidos mediante un enlace insaturado a moléculas de nitrógeno (**Fig. 2.2**). Estos son conocidos como enlaces azo (un doble enlace de nitrógeno a nitrógeno:  $-N=N-$ ) en asociación con un núcleo aromático o heterocíclico por un lado y por el otro pueden estar unidos a una molécula insaturada de tipo carbocíclica heterocíclica o alifática. Los grupos azo están generalmente adheridos a anillos de benceno o naftaleno. El color de estos compuestos azo se debe a los enlaces que están asociados a compuestos cromóforos (Bishop, 1996; Kuppusamy, 1995).

Este grupo se subdivide con relación al número de grupos azo presentes en la molécula del colorante.



**Figura 2.2** Estructura del cromóforo azo

Los colorantes azoicos se conocen como colorantes naftol y por lo general son usados en fibras celulósicas (particularmente algodón). Estos colorantes se forman en la tela durante la operación de teñido por reacción de dos compuestos, a los que el índice de color (CI, Color Index) se refiere como CI-componentes azoicos de acoplamiento y CI-compuestos azoicos diazo.

Entre las ventajas de estos colorantes está la producción de tonos claros y oscuros de diversos colores, su buena resistencia a la luz, al peróxido y a otros blanqueadores.

## 2.3 Tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales con colorantes

El color puede ser removido del agua residual por métodos químicos y físicos, incluyendo absorción, coagulación-floculación, adsorción con carbón activado, oxidación con peróxido de hidrógeno, ozonación, ultrafiltración con membranas y métodos electroquímicos y fotoquímicos. Todos ellos, a excepción del carbón activado, han presentado buenos resultados en la remoción de color, aunque no sucede lo mismo con la remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO, que presentan bajas remociones. Algunos de estos métodos requieren el uso de diferentes reactivos y equipo adicional que incrementa el costo del tratamiento.

Por otro lado se encuentra el estudio de los procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales industriales. En éstos se investiga el tratamiento de las aguas utilizando los sistemas aerobio, anaerobio y una combinación de los dos anteriores.

Existen investigaciones enfocadas especialmente a los sistemas aerobios y anaerobios de manera individual. Los procesos aerobios han sido recientemente usados para el tratamiento de aguas residuales textiles y está confirmado que son eficientes, bien sea de manera individual o en combinación con procesos anaerobios (Khelifi *et al.*, 2008).

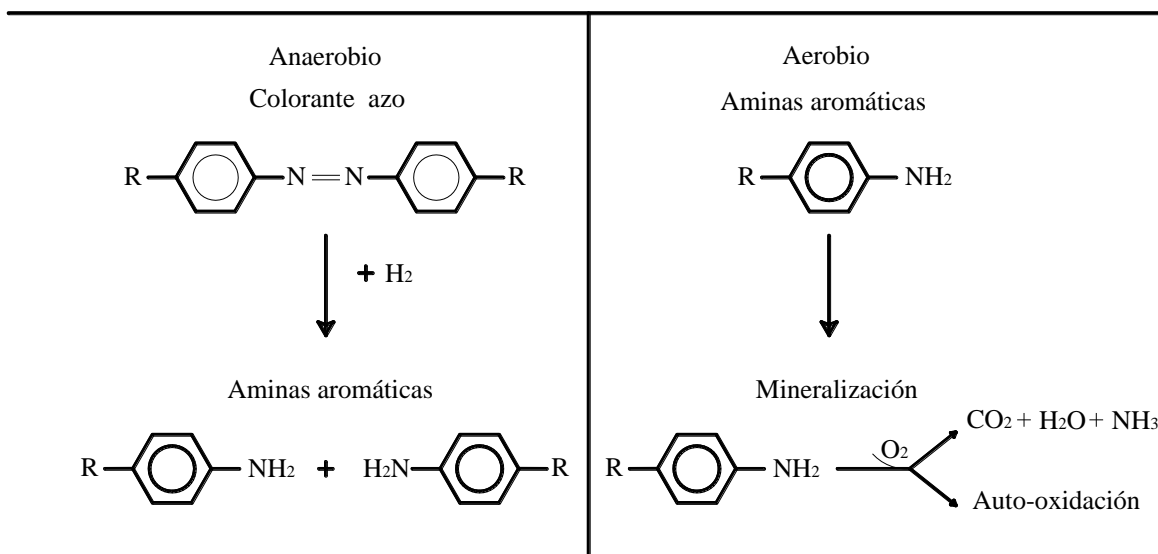
Bajo condiciones anaerobias muchos tipos de bacterias pueden reducir esta clase de colorantes, eliminando la ligadura azo y formando aminas aromáticas (Bishop y Jiang, 1994; Weber y Wolfe, 1987). El tratamiento anaerobio necesita de un co-sustrato y Razo-Flores (1997) observó que la mineralización del naranja 1 mordente, bajo condiciones anaerobias fue sólo posible en la presencia de un co-sustrato como glucosa o ácidos grasos volátiles.

Generalmente, la biodegradación bacteriana de un colorante azo procede en dos etapas. La primera consiste en la división reductiva (condiciones anaerobias) de los enlaces azo, originando la formación de aminas aromáticas (generalmente decoloradas, pero potencialmente peligrosas). La segunda etapa trata la degradación de las aminas aromáticas (proceso exclusivamente aerobio) (**Figura 2.3**). Un tratamiento de agua residual industrial textil en el cual las condiciones aerobias y anaerobias son combinadas, es una opción adecuada para remover azo colorantes de ésta (Field *et al.*, 1995; Knackmuss, 1996).

Dado que los colorantes son difíciles de remover usando los sistemas de tratamiento convencionales basados en procesos aerobios (Lourenco *et al.*, 2000), estudios recientes combinaron condiciones anaerobias y aerobias en un intento por alcanzar no sólo la decoloración, sino también la mineralización de los colorantes azo (Van der Zee y Villaverde, 2005).



Como parte de la combinación de los sistemas aerobio y anaerobio, Bulc y Ojstršek (2008) examinaron la eficacia del tratamiento con humedales artificiales para las aguas residuales de origen textil, con el interés especial en la reducción de color. Para ello realizaron una serie de experimentos en un humedal modelo empacado con grava, arena y roca volcánica con tres aguas residuales sintéticas con colorante usando, además, diferentes sustancias auxiliares y productos químicos que se utilizan en la industria textil. Los resultados obtenidos evidencian que el humedal modelo aplicado reduce color hasta 70% y DQO y COT (carbono orgánico total) hasta 45%. Con base en estos resultados y con la intención de tratar el agua residual del consorcio textil *in situ* construyeron un humedal piloto de flujo vertical (VF) y otro de tipo horizontal (HF) cerca de una fábrica textil. El humedal artificial fue diseñado para 1 m<sup>3</sup>/d, cubriendo 80 m<sup>2</sup>, empacado con arena y grava, y plantado con *Phragmites australis*. La eficiencia media del tratamiento del sistema del humedal para los parámetros seleccionados fue: DQO 84%, DBO 66%, COT 89%, nitrógeno total 52%, nitrógeno orgánico 87%, sulfatos 88%, sólidos suspendidos (SST) 93%, y color 90%. Los resultados probaron que los humedales artificiales ofrecen una solución efectiva para cumplir con la legislación ambiental local.



**Figura 2.3** Mecanismo del proceso de degradación de los colorantes azo y aminas aromáticas durante un tratamiento aerobio y anaerobio (Van der Zee y Villaverde, 2005)

Considerando los biofiltros como sistemas aerobios o anaerobios, Quezada, Linares y Buitrón (2000) investigaron la degradación de colorantes azo en un biofiltro aerobio operado en un sistema discontinuo secuencial (SBR, “reactor discontinuo secuencial” en inglés). Los colorantes azo estudiados fueron el rojo ácido 151 (RA151) y un efluente textil que contenía los tintes: azul básico 41, rojo básico 46 y 16 y amarillo básico 28 y 19. En el caso del RA151 se obtuvo una tasa máxima de degradación de 288 mg de RA151/L-d; las eficiencias de degradación de color se encontraron entre 60 y 99%. Los estudios de mineralización mostraron que 73% del colorante azo inicial fue transformado a CO<sub>2</sub>. El efluente textil fue biodegradado eficientemente presentando una tasa máxima de remoción de 2.3 kg de DQO/L-d, y, con eficiencias de remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO, entre 76 y 97%. En todos los ciclos el sistema presentó el 80% de remoción de color.

Cruz y Buitrón (2000) estudiaron la mineralización del colorante azo azul disperso 79 (AD79) por medio de un biofiltro discontinuo secuencial, bajo condiciones anaerobias y aerobias. En la primera etapa del experimento (condiciones anaerobias), concluyeron que el uso de un co-sustrato influyó su funcionamiento alcanzando remociones de colorante mayores al 95% con una concentración inicial del colorante superior a 48 mg/L.

Khelifi *et al.* (2008), con el objetivo de eliminar y biodegradar el color índigo de aguas residuales textiles, estudiaron un sistema aerobio combinado, usando un reactor tipo CSTR (reactor continuo de tanque agitado, por sus siglas en inglés) y un biorreactor de película fija. Estos sistemas presentaron altas eficiencias en la remoción de DQO y color de 97.5 y 97.3%, respectivamente, obtenidos con un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 4 días.

## 2.4 Tecnologías combinadas

Una ventaja de la utilización de tecnologías combinadas o acopladas para el tratamiento de diferente tipo de efluentes, es utilizar las características sobresalientes de cada uno de los sistemas en forma individual y optimizar el tratamiento al utilizarse en forma combinada.

Esto es el caso de la combinación de biofiltros con humedales que ya se investigaron para el tratamiento de efluentes industriales, entre ellos los textiles (Moeller *et al.*, 2007).

Cervantes (2009), estudió este sistema para el tratamiento de aguas residuales para viviendas unifamiliares. En este caso, se combinaron las ventajas de la biofiltración con lecho orgánico (madera de tabachín triturada), y el sistema de humedales artificiales con flujo vertical sub-superficial, utilizando la planta llamada cuna de Moisés (*Spathiphyllum wallisii*). Se trató un caudal medio de 700 L/día. Se obtuvieron remociones del 98% para DQO y 99.5% para sólidos suspendidos totales (en adelante, SST). La remoción media de fósforo fue del 73.2% y de 95.4% para nitrógeno (N-NH<sub>4</sub>).

Hernández (2009) y Hernández y Moeller (2008) probaron un sistema combinado consistente en un biofiltro percolador anaerobio acoplado a humedales artificiales. Los sistemas se alimentaron con agua sintética preparada con tres tipos de colorantes azoicos: amarillo directo 36, azul negro y negro celupel. Se observó la reducción del 92% con respecto a la DQO y del 90% con respecto al color.

## 2.5 Biofiltros, biopelícula

Los biofiltros son unidades o recipientes empacados con un medio filtrante, con líneas de entrada y salida para el agua y/o sustancias a tratar; eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes a través del flujo de una corriente, ya sea aire o agua, atravesando el medio filtrante, compuesto por material poroso y en el que se lleva a cabo un proceso biológico.

La biofiltración es un proceso de filtración lenta y pasiva sobre un lecho orgánico (paja, turba, madera, etc.), y se basa en la capacidad que tienen ciertos medios orgánicos de actuar como una resina natural capaz de fijar diferentes sustancias contaminantes y de favorecer la implantación de microorganismos. Los biofiltros, por tanto, son sistemas de cultivo fijo, donde las bacterias asimilan y biodegradan la materia orgánica, contenida en el agua proveniente de un tratamiento primario y transforman la materia retenida a formas más

simples que son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta su subsecuente retiro o limpieza.

Esta tecnología permite operar el sistema para aguas residuales de origen urbano e industrial a temperatura variable, así como con grandes fluctuaciones de carga orgánica disuelta con tiempos de residencia hidráulica muy cortos<sup>5</sup>. En el caso de Buelna (2008), el proceso de biofiltración aplicado al agua de una porqueriza, a pesar de las grandes variaciones en los parámetros medidos, obtuvo excelentes remociones, entre ellas: más del 95% en DBO, 97% para sólidos suspendidos, más del 84% para nitrógeno total Kjeldahl, y mayor al 87% para el fósforo total, reduciendo la carga orgánica más del 95%.

Los biofiltros requieren bajos costos de operación; generalmente se trata de equipos montados y probados en plataformas; son sistemas completamente cerrados, sin generación de malos olores; los periodos de ejecución en su instalación son mínimos y requieren de mínima obra civil y simplicidad en su manejo. Sus desventajas son que debe disponerse adecuadamente del material una vez que se satura.

La **Figura 2.4** muestra el principio de operación de un biofiltro. El influente se alimenta por la parte superior del biofiltro, percolando lentamente a través del lecho orgánico en donde es tratado mediante los siguientes procesos simultáneos y naturales (Garzón-Zúñiga, 2002):

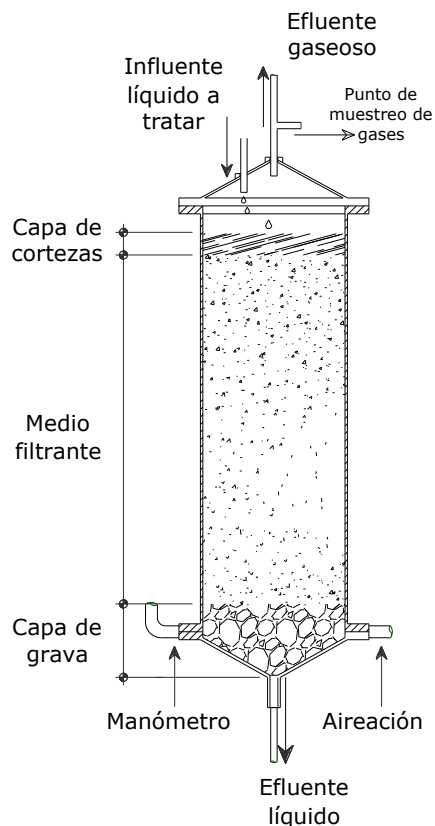
- Filtración lenta y pasiva (reducción de sólidos)
- Absorción, adsorción e intercambio iónico (retención de contaminantes)
- Biodegradación (reducción de la DBO, nitrógeno, fósforo y regeneración natural de las propiedades de absorción/adsorción del lecho orgánico) y
- Desinfección (eliminación de patógenos)

El medio filtrante sirve como soporte para el desarrollo de importantes poblaciones de microorganismos que degradan los contaminantes retenidos en el filtro, regenerando así la capacidad de filtración y de depuración del sistema (Garzón-Zúñiga 2002). Asimismo expone la máxima área superficial al flujo del líquido bajo tratamiento y de la superficie

---

<sup>5</sup> [www.ufbaf.com](http://www.ufbaf.com)

mojada al contacto con el aire. La configuración del empaque debe permitir suficientes espacios entre las superficies adyacentes para que pueda proliferar la biopelícula sin que los intersticios queden bloqueados, y permitir así el flujo de líquido y el aire a través del lecho.



**Figura 2.4** Principio de operación de un biofiltro  
(Garzón-Zúñiga, 2002)

La biofiltración sobre un lecho de turba es una tecnología no convencional para el tratamiento de aguas residuales, la cual combina los principios de los biofiltros para tratamiento de olores y los de los filtros percoladores o rociadores (Garzón-Zúñiga, 2002). Este investigador hizo el estudio de la remoción de contaminantes a través de la biofiltración sobre turba de 3 diferentes tipos de agua residual: Agua residual de una granja porcícola, agua con colorante industrial naranja ácido 24 y agua residual de un complejo petroquímico. La remoción de la DQO para los dos primeros influentes fue mayor del 90% pero para el último influente fue ligeramente mayor al 50%. Así mismo, Moeller *et al.* (2007) experimentaron la remoción de tres diferentes tipos de colorantes azo mediante la biofiltración. Utilizando un sistema biológico de tratamiento secuencial anaerobio – aerobio

de biomasa suspendida, se lograron remociones mayores al 70% de DQO, reducciones mayores al 72% de color y más del 70% en la remoción de DBO. En el caso de los biofiltros empacados con madera de jacaranda, las remociones de DQO fueron nulas, pero, las remociones de color estuvieron por encima del 86% y en la DBO, por arriba del 70% (Moeller *et al.*, 2007). Esto indicaría que se rompieron los enlaces que dan color pero que los compuestos que dan la DQO permanecieron inalterados.

Los microorganismos proliferan, se reproducen y producen sustancias poliméricas extracelulares, las cuales frecuentemente se extienden de la célula formando una matriz gelatinosa llamada “biopelícula” (Bryers y Characklis, 1990). Estos exopolímeros consisten principalmente de una variedad de polisacáridos heterogéneos dependiendo del tipo de microorganismos involucrados (Lazarova y Manem, 1995).

Típicamente, después de que algunos microorganismos se han adherido a la superficie del medio de soporte estos comienzan a reproducirse, produciendo la biopelícula, la cual es aerobia. Conforme el desarrollo microbiano continúa, la difusión del oxígeno a través de la biopelícula puede volverse limitante y una capa anaerobia se desarrolla a lo largo de la superficie del medio de soporte. La remoción de materia orgánica del agua residual implica una proliferación continua de bacterias y consecuentemente una biopelícula más gruesa. Este proceso de acumulación es generalmente balanceado por el desprendimiento de la biopelícula (Henze *et al.*, 1995).

## 2.6 Humedales

Los humedales son áreas o lechos saturados con agua que contienen plantas acuáticas. Para su desarrollo, las plantas toman los nutrientes presentes en el agua y, aprovechando la energía solar y la actividad biológica de los microorganismos presentes en el sistema, los humedales son considerados como un sistema conveniente para el tratamiento de las aguas residuales. Éstos pueden ser naturales o artificiales.

Los sistemas de tratamiento con humedales se utilizan para tratar aguas residuales municipales, industriales y agrícolas (Rodríguez-Monroy y Durán de Bazúa, 2006), así

como aguas ácidas de drenaje de mina (Ruiz-López, 2009). Sin embargo, los diseños para estos sistemas siguen siendo individualistas y variables (Kadlec y Knight, 1996). Un humedal artificial permite remociones altas de DBO, DQO, sólidos suspendidos totales, nitrógeno, metales y patógenos (EPA, 1988). La remoción aumenta con el tiempo de residencia y con la temperatura adecuada. La remoción de DBO puede ser del 60 al 80% y de sólidos suspendidos del 50 al 90% (Romero-Rojas, 2004).

En los humedales se lleva a cabo un alto índice de actividad biológica y éstos transforman gran parte de los contaminantes comunes que se encuentran en el agua residual en productos menos agresivos al ambiente o nutrientes esenciales. Estas transformaciones de contaminantes pueden ser obtenidas con bajos costos de construcción, bombeo, tubería e instalaciones. Los humedales son sistemas de tratamiento que se distinguen por sus bajos costos de operación y mantenimiento (EPA, 1988; Kadlec and Knight, 1996; Sundaravadivel y Vigneswaran, 2001). Un humedal artificial representa una forma fácil para dar tratamiento a las aguas residuales.

El desempeño de los humedales es variable e influenciado por diversos factores tales como la temperatura del agua y del aire, el sustrato, la sedimentabilidad, la concentración de contaminantes y el tipo de vegetación. Estas condiciones causan cambios en la respuesta o liberación de sustancias químicas y actividades bioquímicas de los microorganismos y las plantas (Bulc y Ojstršek, 2008). Las dimensiones y área total del sistema, así como su configuración geométrica (largo-ancho), influirán en la distribución y velocidad del flujo, y éstos, junto con la temperatura y el tiempo de residencia hidráulica, se ven también relacionados con los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el tratamiento. Intervienen de igual forma, la conductividad hidráulica, la profundidad del agua y el modo de alimentación de la misma.

Los procesos de remoción de contaminantes en un humedal ocurren por la interacción entre la vegetación, la columna de agua y el sustrato o empaque. Los procesos pueden ser físicos, químicos o biológicos.

Proceso físicos.- Éstos ocurren debido a distintos fenómenos como: la obstrucción de las vías del agua residual mejorando la sedimentación de los sólidos suspendidos; la actuación

del sustrato como filtro ayudando a la remoción de sólidos suspendidos; las fuerzas de atracción entre partículas favoreciendo la adsorción.

Procesos químicos.- La exposición a los gases atmosféricos y a la luz del sol puede dirigir la ruptura de pesticidas y/u otras sustancias orgánicas y la destrucción de patógenos. Considerada como actividad química, se lleva a cabo la formación de co-precipitación con compuestos insolubles; la adsorción en la superficie del sustrato y de las plantas; la descomposición de compuestos por fenómenos como la radiación UV, la oxidación y la reducción.

Procesos biológicos:- Los humedales artificiales son sistemas en los que los procesos biológicos llevan a cabo las reacciones más importantes en la remoción de contaminantes. Se considera que las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido. Son seis las reacciones biológicas que han sido identificadas: la fotosíntesis, la respiración, la “fermentación”<sup>6</sup>, la nitrificación, la desnitrificación y la remoción de fósforo (Sundaravadivel y Vigneswaran, 2001).

La idea original para emplear humedales artificiales en el tratamiento de agua residual es la habilidad de las plantas acuáticas de transportar oxígeno a sus raíces y sus alrededores. Las plantas desempeñan un papel importante en la ocurrencia de la mayoría de los procesos de remoción. En la columna de agua, los tallos y hojas de las plantas incrementan significativamente el área superficial para el desarrollo de la biopelícula. El tejido de las plantas es colonizado por algas fotosintéticas así como por bacterias y protozoarios. Las raíces y rizomas que están enterrados proveen un sustrato para el crecimiento de los microorganismos (Sundaravadivel y Vigneswaran, 2001).

La vegetación emergente más comúnmente utilizada son las espadañas y aneas (*Typha* spp.), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp.).

---

<sup>6</sup> Fermentación fue el nombre dado por Louis Pasteur a la bioconversión de glucosa en condiciones anaerobias a etanol y CO<sub>2</sub> por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Por ignorancia, durante muchos años a cualquier biorreacción se le llamaba fermentación. Actualmente, solamente se usa para lo que Pasteur desarrolló



El tratamiento por medio de humedales artificiales, así como lo ya descrito, presenta las ventajas y desventajas resumidas en la **Tabla 2.2**.

Un humedal artificial normalmente incluye uno o más canales de poca profundidad, que son recubiertos con geomembranas u otros sistemas que hagan impermeable al humedal, reduciendo la contaminación del subsuelo y de los mantos freáticos, muy importante hoy en día por la contaminación del agua potable (Rodríguez-Monroy y Durán de Bazúa, 2006). Cuentan con estructuras de entrada y descarga para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada.

Los sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y/o el tipo de vegetación presente. Existen dos tipos de humedales artificiales: los humedales artificiales de flujo libre superficial (HAFLS), y los humedales artificiales de flujo sub-superficial (HAFS), que se describen abajo.

**Tabla 2.2** Ventajas y desventajas de los humedales artificiales (EPA, 2000a, b)

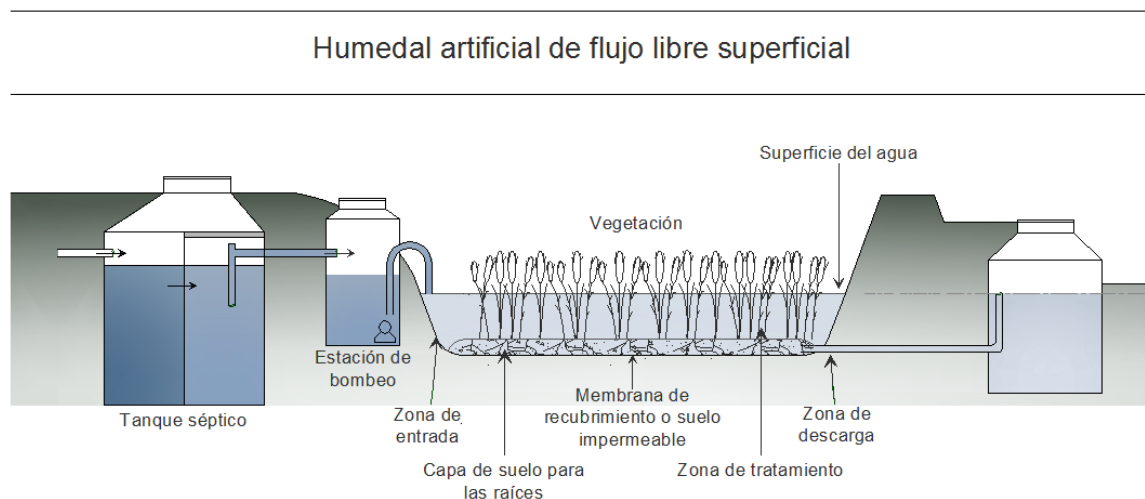
| <b>Ventaja</b>  | <b>Desventaja</b>  |
|---|--|
| Es posible la remoción de nutrientes con un tiempo de residencia hidráulica mayor                             | Para lograr los tiempos de residencia más largos, es necesario una extensión de terreno grande                                     |
| La operación a nivel de tratamiento terciario es posible durante todo el año en climas cálidos o semi-cálidos | En climas fríos disminuye la remoción de la DBO, la nitrificación y desnitrificación (se puede compensar con el aumento en el TRH) |
| Presentan una efectiva remoción de metales y compuestos orgánicos   | Algunos metales pueden permanecer como sedimentos en el sistema  |
| El empleo de equipo sofisticado, electricidad y seguimiento es mínimo   | El fósforo se acumula en los sedimentos  |
| La producción de biosólidos y lodos es mínimo   | Requiere un tratamiento subsiguiente para lograr la desinfección   |
| Proporcionan una adición valiosa a las áreas verde de la comunidad y la incorporación de vida silvestre       |  |

## 2.6.1 Humedales artificiales de flujo libre superficial

Son aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. En los HAFLS el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. Este tipo de humedales, cuenta con una capa sumergida de suelo sobre el recubrimiento, para proporcionar un sustrato a las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Las porciones sumergidas de las plantas vivas, los ramales erguidos de las muertas, y los detritos acumulados proporcionan el sustrato físico para el crecimiento de los organismos responsables de la mayoría del tratamiento biológico en el sistema. La profundidad del agua en las porciones con vegetación de estos sistemas va desde algunos centímetros hasta más de 60 cm.

La mayor fuente de oxígeno para la degradación microbiana son la aireación en la superficie del agua y el transporte de oxígeno desde las hojas de las plantas hasta la rizosfera (EPA, 1988). Una de las desventajas que pueden presentar este tipo de humedales es la presencia de mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades (EPA, 2000a). La

**Figura 2.5** muestra la configuración de un HAFLS.



**Figura 2.5** Humedal artificial de flujo libre superficial (HAFLS)  
(modificado de: <http://www.ecobine.de>)

## 2.6.2 Humedales artificiales de flujo sub-superficial

Un HAFS está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual o su fase final de tratamiento y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado.

La grava es el medio más utilizado en varios países, aunque de igual forma se ha utilizado roca triturada, arena y otro tipo de suelos o rocas. Por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio.

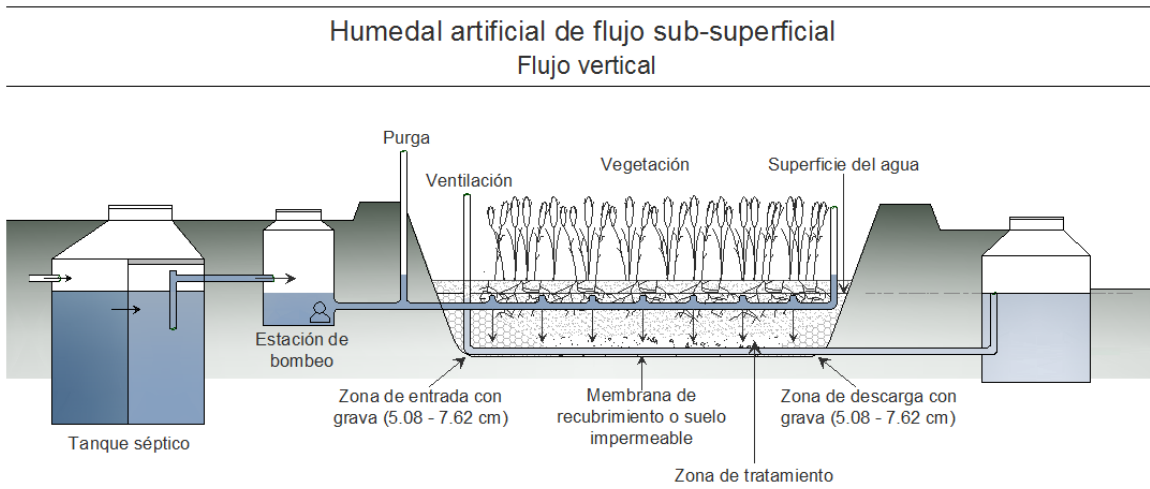
Las principales ventajas de mantener un nivel sub-superficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que las personas entren en contacto con el agua residual parcialmente tratada.

El sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio, y la superficie misma del medio. En este sistema muchos de los sistemas individuales de menor tamaño usan plantas decorativas tolerantes a la humedad.

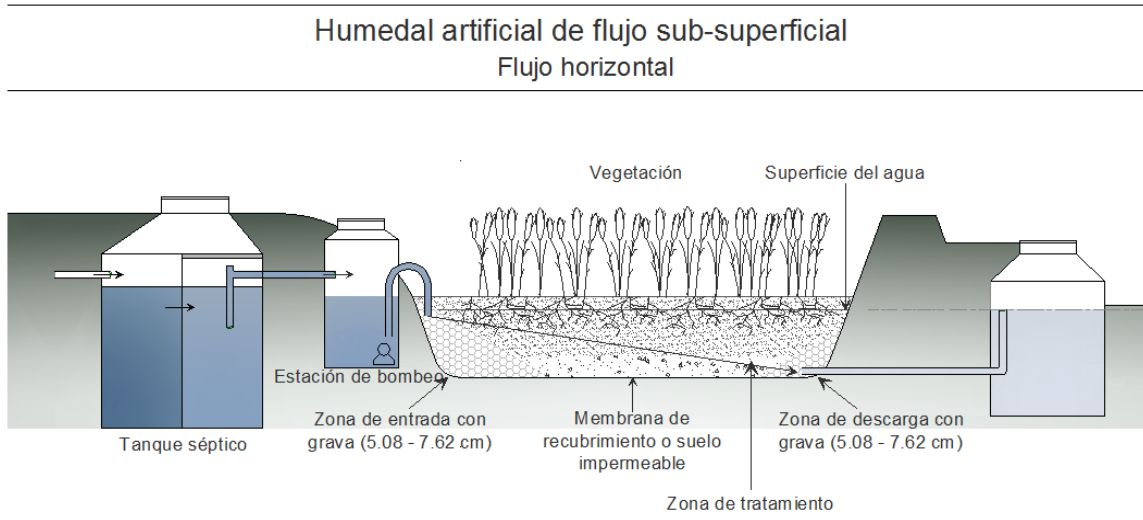
La profundidad del medio varía de 0.3 a 0.9 metros, siendo el valor más común el de 0.6 metros. El tamaño del medio va desde la grava fina 0.6 cm hasta roca grande triturada ( $\geq 15.2$  cm). Este medio de grava debe ser de piedras limpias, duras y duraderas, con capacidad de retener su forma y la permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo (Durán de Bazúa y Luna Pabello, 1998; EPA, 2000a). El sistema es construido con una ligera inclinación entre la entrada y salida (1-3%) (EPA 1988).

La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos. La configuración de los HAFS proporciona una mayor protección térmica que los HFLS.

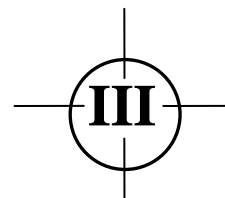
Los HAFS pueden ser de dos tipos: con flujo horizontal y con flujo vertical. Sus características son similares entre sí, a excepción de que el agua fluye a través del humedal en sentido horizontal o vertical (EPA, 2000b). Las **Figuras 2.6** y **2.7** muestran estos dos tipos de humedales.



**Figura 2.6** Humedal artificial de flujo sub-superficial – vertical  
(modificado de: <http://www.ecobine.de>)



**Figura 2.7** Humedal artificial de flujo sub-superficial – horizontal  
(modificado de: <http://www.ecobine.de>)



---

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

### 3.1 Agua residual a tratar

El agua a tratar proviene de una empresa textil cooperante que produce fibras de algodón y manufactura “playeras”; está ubicada en el Municipio de Jiutepec, Morelos, México y en su proceso de teñido emplea colorantes azo, que son el objeto de estudio en este trabajo.

Las **Figuras 3.1** y **3.2** muestran la complejidad del proceso de teñido en la empresa textil de donde se ha tomado el agua residual en estudio. Con base en ese proceso se determinaron los tres tipos de agua residual con los que se alimentó el sistema experimental. Cada tipo de agua tiene una composición diferente a saber:

- 1.** Agua residual tipo I – Agua residual de medio blanqueo – Consiste en la dilución al 10% de agua proveniente del medio blanqueo en agua residual municipal. El agua de medio blanqueo contiene sólo los aditivos empleados en el proceso de teñido como auxiliares antes de la fijación de color (**Figura 3.1**). Los aditivos y sus concentraciones se muestran en la **Tabla 3.1**.

2. Agua residual tipo II – Agua residual de baño de teñido – Se conforma por la dilución al 10% de agua proveniente del baño de teñido en agua residual municipal. Una mezcla de colorantes de tipo reactivo es la componente principal del baño de teñido, el resto de los componentes, así como el proceso completo se observa en la **Figura 3.2**. La mezcla proporciona un color negro a las prendas que tiñe (Black Jack 1491). Los colorantes y sus concentraciones se muestran en la **Tabla 3.2**

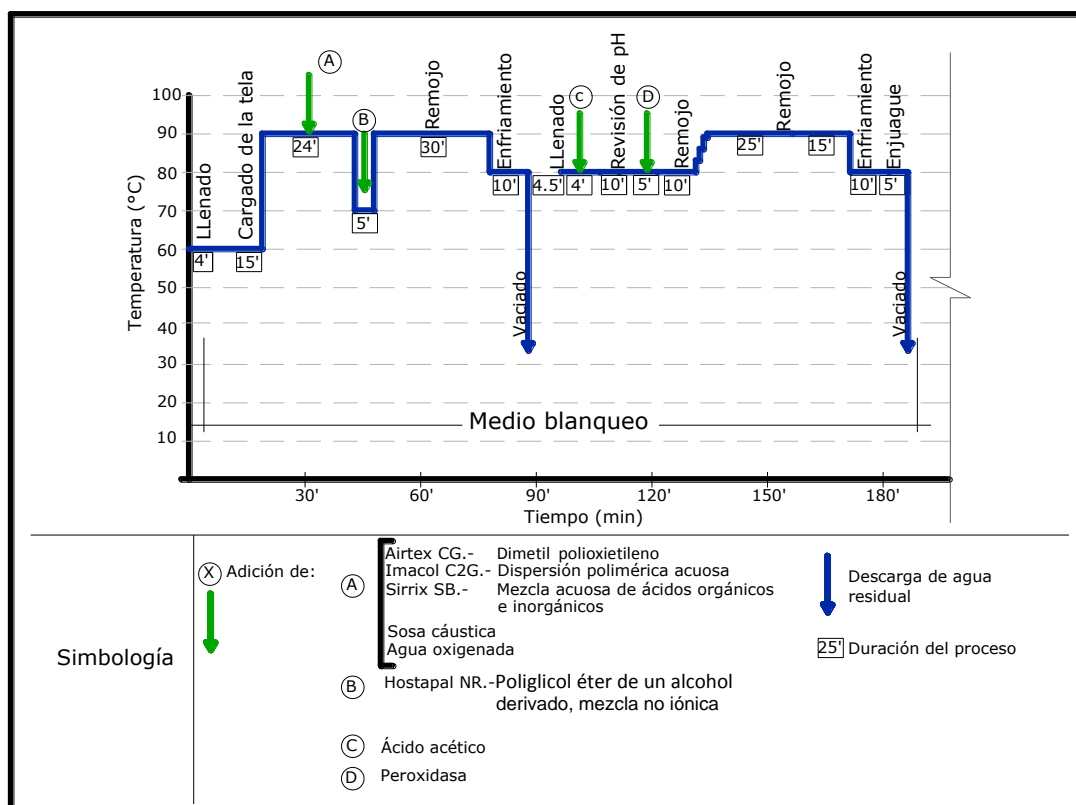
**Tabla 3.1** Aditivos incluidos en el agua residual de medio blanqueo y sus respectivas concentraciones (nombre comercial y función)

| <b>Compuesto</b>  | <b>Concentración<br/>(g/L)</b> |
|---|--------------------------------|
| <i>Airtex CG</i> – antiespumante<br>(Dimetil polioxietileno)  | 0.15                           |
| <i>Sirrix SB</i> – estabilizador de peróxido<br>(Mezcla acuosa de ácidos orgánicos con sales orgánicas e inorgánicas) | 1.40                           |
| Sosa cáustica líquida   | 2.00                           |
| Agua oxigenada  | 2.00                           |
| <i>Hospital NR</i> – detergente<br>(Poliglicol éter de un alcohol derivado formando una mezcla no iónica)             | 1.50                           |
| Ácido acético   | 1.20                           |
| <i>Biosil cat</i> – peroxidasa  | 0.67                           |
| <i>Ladiquest</i> – secuestrante<br>(Mezcla de policarboxilatos y fosfanatos)  | 2.00                           |
| <i>Skiantan NW</i> – Secuestrante y dispersante<br>(Compuesto orgánico sulfuroso)                                     | 1.00                           |
| Cloruro de sodio (sal)  | 90                             |

El porcentaje de colorante residual en el efluente textil se estima con base en los datos obtenidos de la literatura revisada para este tipo de colorantes; de donde se observa que tal porcentaje varía entre el 10 y 50% de la concentración inicial empleada en el baño de teñido (O'Neill *et al.*, 1999).

**Tabla 3.2** Colorantes incluidos en el agua residual del baño de teñido y sus respectivas concentraciones (Mezcla que conforma el color “Black Jack 1491”)

| Compuesto         | Tipo de colorante      | Concentración original | Porcentaje residual en el agua | Concentración experimental |
|-------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|                   |                        | g/L                    | %                              | g/L                        |
| Amarillo Ciba S3R | Colorante azo reactivo | 0.61                   | 35                             | 0.21                       |
| Negro Ciba G      | Colorante azo reactivo | 2.62                   | 35                             | 0.92                       |
| Rojo Ciba R       | Colorante azo reactivo | 8.13                   | 35                             | 2.85                       |

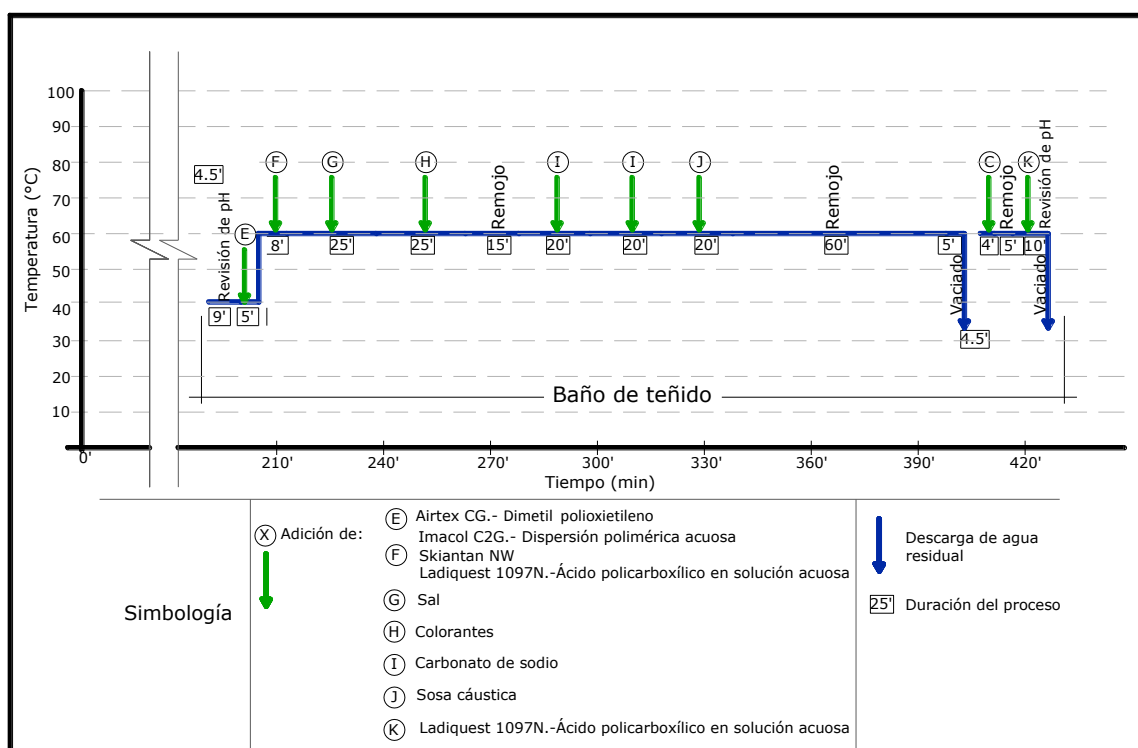


**Figura 3.1** Etapa de medio blanqueo en el proceso de teñido para algodón en color “Black Jack 1491” de la empresa cooperante

3. Agua residual tipo III – Mezcla de aguas residuales – Se conforma por la combinación de los tipos de agua residual I y II en una proporción 1:1. El

propósito es tener una mezcla del baño de teñido con el agua de medio blanqueo tal y como se lleva a cabo en la industria.

Para realizar la caracterización de los tres distintos tipos de agua residual a estudiar, se analizaron los siguientes parámetros: DQO, DBO, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), nitrógeno amoniacal ( $N-NH_4$ ), nitrógeno total ( $N_T$ ), pH, temperatura, y CE. Se utilizaron las metodologías oficialmente aprobadas en los métodos estándar (APHA-AWWA-WPCF, 1992).



**Figura 3.2** Obtención del baño de teñido en la tinción de algodón en color “Black Jack 1491” de la empresa cooperante

De la misma manera se midió color aparente, color verdadero y concentración de colorante en el agua residual empleando un espectrofotómetro HACH modelo DR/2400. Se preparó una muestra de agua sintética, utilizando como referencia las concentraciones de colorante y aditivos que utiliza la maquiladora de playeras, lo anterior, para hacer las curvas patrón que permitieran evaluar las concentraciones de colorante en el agua en estudio.



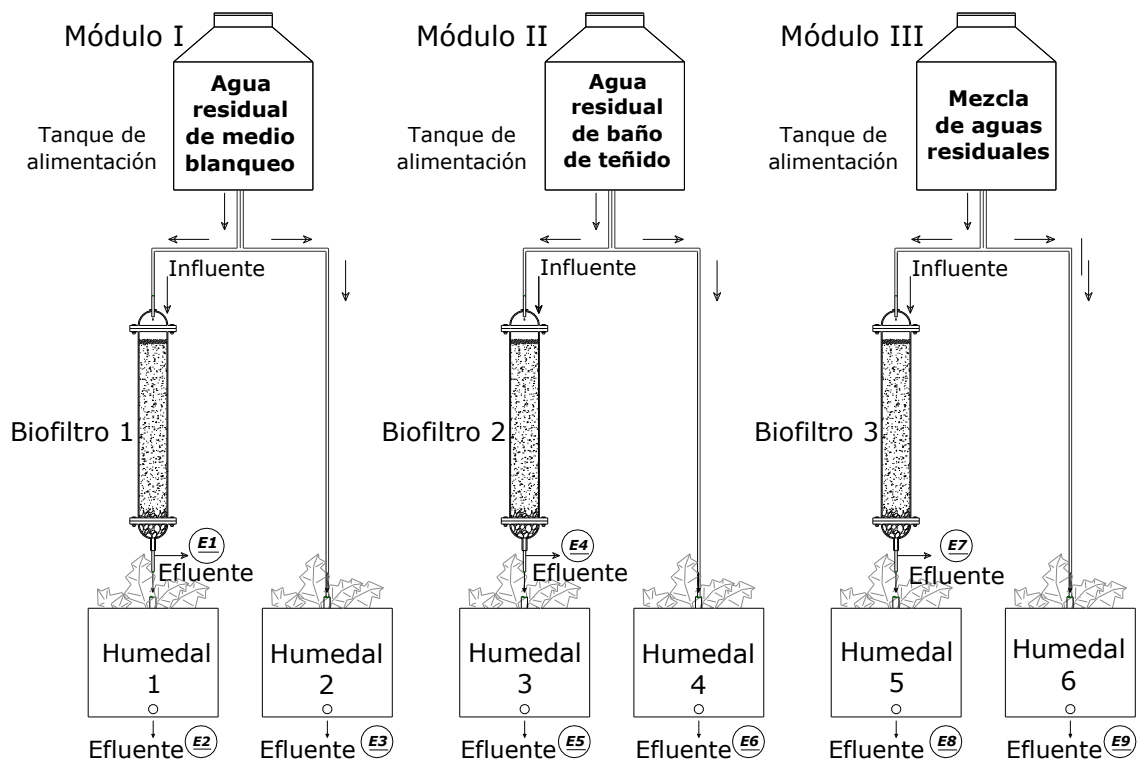
## 3.2 Selección de colorantes

La selección de los colorantes se hizo considerando que la mezcla de colorantes que se estudia es la que con mayor frecuencia se presenta en el proceso de teñido en la fábrica y, por lo tanto, la de mayor disponibilidad en el tiempo de estudio. Se realizaron barridos espectrofotométricos a una muestra de la solución madre de colorantes y a una solución preparada con las concentraciones originales de los colorantes que se usan en el teñido de color “Black Jack 1491”. Los barridos se realizaron empleando un espectrofotómetro HACH modelo DR/2400, con las siguientes diluciones de la solución madre: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90%. Con estas mismas soluciones se construyó una curva de calibración a la longitud de onda de la máxima respuesta de absorbancia (678 nm).

Se realizaron barridos espectrofotométricos a una muestra del baño de teñido, así como a diluciones de éste al 0.5, 1, 2, 5, 20 y 50%.

## 3.3 Sistema experimental

El sistema experimental consistió en tres módulos a escala de banco. La razón de que sean tres módulos es porque cada módulo se alimentó con un diferente tipo de agua residual. Cada módulo evalúa el efluente de tres líneas de tratamiento: la primera constituida por un biofiltro anaerobio; la segunda, por el efluente obtenido del mismo biofiltro seguido por un humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial (en adelante, HAFH), y, la tercera conformado únicamente por un HAFH; todas estas alimentadas con agua residual del mismo tipo. El seguimiento del sistema consistió en la evaluación analítica del efluente de cada línea de tratamiento: biofiltro, biofiltro-HAFH y HAFH, así como del influente (para cada módulo). Estos módulos funcionan con los tres tipos de agua residual en estudio: agua residual tipo I – agua residual de medio blanqueo (AR medio blanqueo) – (módulo I); agua residual tipo II – agua residual del baño de teñido (AR baño de teñido) – (módulo II); y, agua residual tipo III –mezcla de aguas residuales (mezcla AR) – (módulo III). La **Figura 3.3** muestra el esquema de la configuración del sistema experimental.



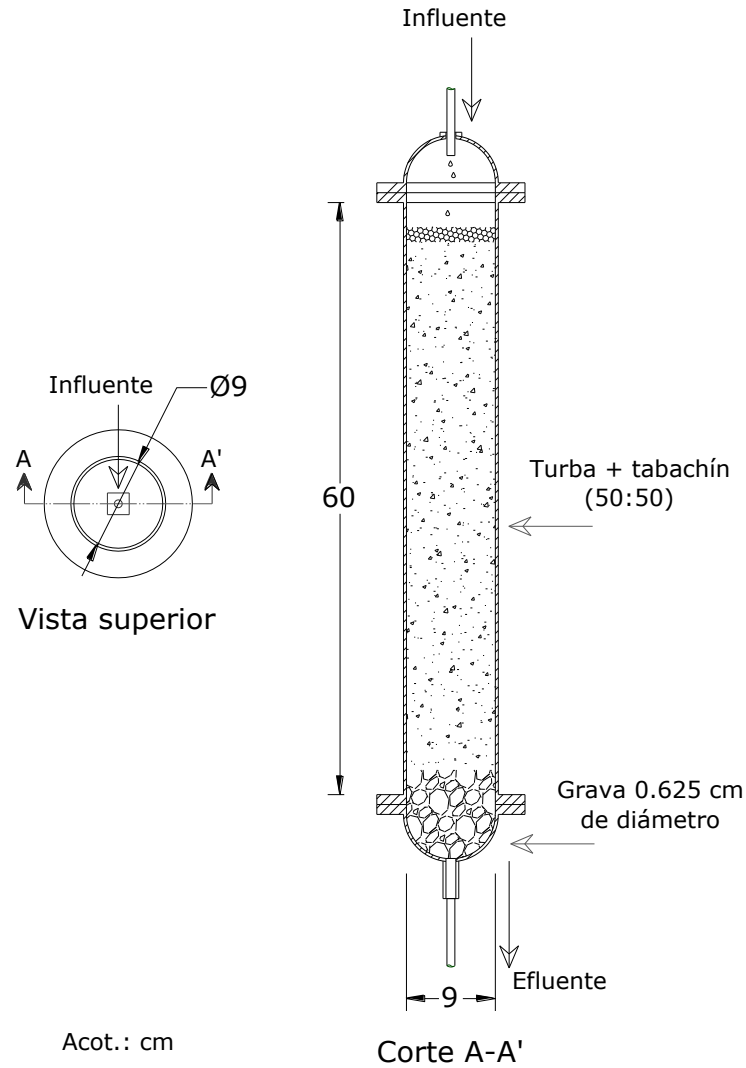
**Figura 3.3.**Esquema del sistema experimental

### 3.3.1 Biofiltros

Los biofiltros utilizados, están contruidos con acrílico de 3 mm de espesor, miden 60 cm de altura y 9 cm de diámetro interior, tienen una capacidad volumétrica máxima de 4.5 L. La entrada para la alimentación es un orificio en la tapa superior y la salida del efluente está en la tapa inferior. La **Figura 3.4** muestra un esquema del biofiltro.

#### 3.3.1.1 Materiales de empaque

El material de empaque del biofiltro se conforma por una mezcla de 50% de turba y 50% de trozos de madera de tabachín (*Caesalpinia pulcherrima*); el porcentaje se considera en volumen. El material de soporte para el empaque es grava fina, con una granulometría de 0.635 cm.



**Figura 3.4** Biofiltro utilizado

La selección de la turba se hizo considerando que ha demostrado ser un medio eficiente para el tratamiento de aguas residuales (Viraraghavan y Ayyaswami, 1987). Se ha reportado el uso de turba para la remoción de efluentes textiles (Poots *et al.*, 1975; Stephen *et al.*, 1988) debido a que se ha reconocido que posee una combinación de sustancias químicas y de propiedades físicas, tal como la absorción y adsorción que ayudan en la remoción de contaminantes. La turba tiene un área superficial  $>200 \text{ m}^2/\text{g}$  y una porosidad de 95%. Estas propiedades junto con la adsorción, le confieren la capacidad de ser utilizada

como soporte para la formación de biopelículas donde la degradación microbiana puede ocurrir.

La madera de tabachín fue seleccionada por su disponibilidad en la región, posee características adecuadas para ser utilizada como medio filtrante en biofiltros tratando agua residual con colorantes (García, 2007, Hernández, 2009), Sus características principales son: alta porosidad, alta capacidad de retención de humedad y alto contenido de lignina y celulosa (Garzón-Zúñiga, 2002).

El volumen que ocupa la mezcla de turba y tabachín en cada biofiltro es de 3.5 L. El tabachín se obtuvo de la poda periódica de los árboles del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (en adelante, IMTA). Se puso a secar, se trituró y tamizó utilizando únicamente los trozos de madera retenidos en la malla con un tamaño de abertura de 0.635 cm y que pasaron el tamiz con abertura de 0.9 cm.

La turba se utilizó sin ningún acondicionamiento, pues al tamizarla ocurre su compactación en el biofiltro, lo que origina taponamientos y cortos circuitos. La mezcla obtenida se humedeció hasta un 60% de humedad. Una buena aproximación para este contenido de humedad se obtiene cuando al exprimir el material con la mano escurren unas cuantas gotas de agua (Garzón-Zúñiga, 2002).

### **3.3.1.2 Parámetros de operación**

Se caracterizó el material de empaque del biofiltro siguiendo la metodología de Garzón-Zúñiga (2002). De esta forma se realizaron las pruebas de densidad y de vaciado de los materiales con los que se empacaron los biofiltros. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 3.3**.

**Tabla 3.3.** Densidad de los materiales del biofiltro

| <b>Material</b>     | <b>Densidad (g/mL)</b> |
|---------------------|------------------------|
| Turba               | 0.76                   |
| Tabachín (0.625 cm) | 0.67                   |
| Mezcla 1:1          | 0.60                   |

Los parámetros de operación de los biofiltros que se obtuvieron de las pruebas de vaciado fueron los siguientes:

|                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Carga hidráulica volumétrica:         | 0.7 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> d |
| Caudal:                               | 2.5 L/d                              |
| Carga orgánica volumétrica:           | 0.57 kg DQO/m <sup>3</sup> d         |
| Tiempo de residencia hidráulica, TRH: | 2.1 d                                |

Todos los sistemas con biofiltros funcionaron con estas condiciones de operación a pesar de que el agua residual que recibieron tenía una diferente concentración de contaminantes.

### **3.3.1.3 Montaje e inoculación de los biofiltros**

Partiendo de los buenos resultados obtenidos en el empleo de dos biofiltros empacados con turba y tabachín, para el tratamiento de agua con azo-colorantes, (Mendoza, 2010), se utilizaron, en este trabajo, los dos biofiltros existentes y se incorporó otro al sistema.

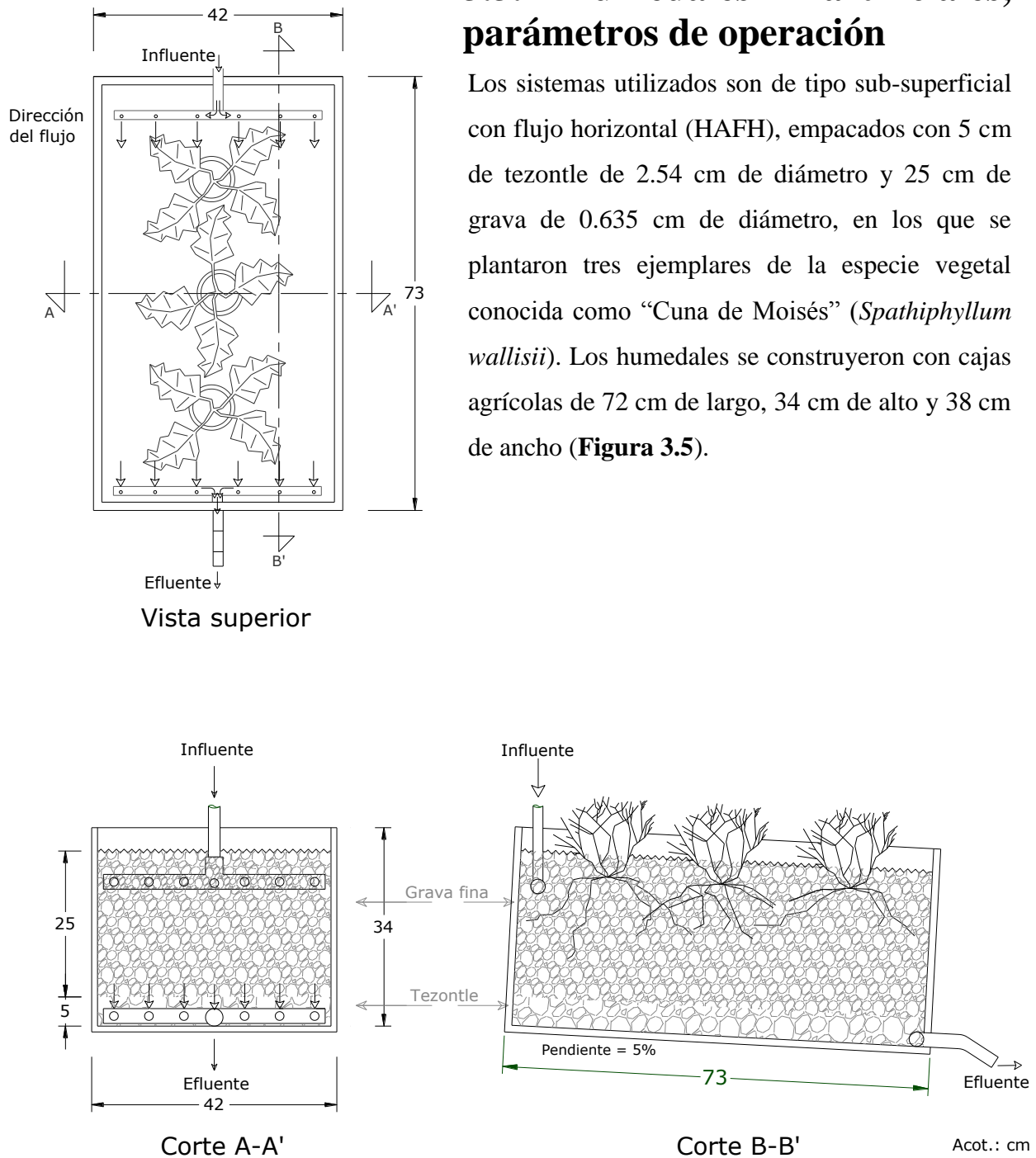
La inoculación se llevó a cabo utilizando el empaque de los biofiltros existentes que contenía ya poblaciones formadas por microorganismos aclimatados a los colorantes tipo azo, se extrajo y se combinó con el empaque del nuevo biofiltro. Con esta mezcla se empacaron los tres cilindros, sobre el medio de soporte, teniendo cuidado de no compactar demasiado el medio filtrante y aprovechar al máximo el volumen del biofiltro. Finalmente, los biofiltros se forraron con aluminio para evitar la proliferación de algas y los taponamientos que éstas provocan.

Para la alimentación del agua residual a los biofiltros se utilizaron bombas peristálticas modelo 7518-10 Masterflex,L/S Cole Parmer.

El efluente del biofiltro llega por gravedad al humedal subsecuente, éste, se recolecta en el humedal por medio de una tubería perforada de PCV de 1.25 cm de diámetro (**Figura 3.4**).

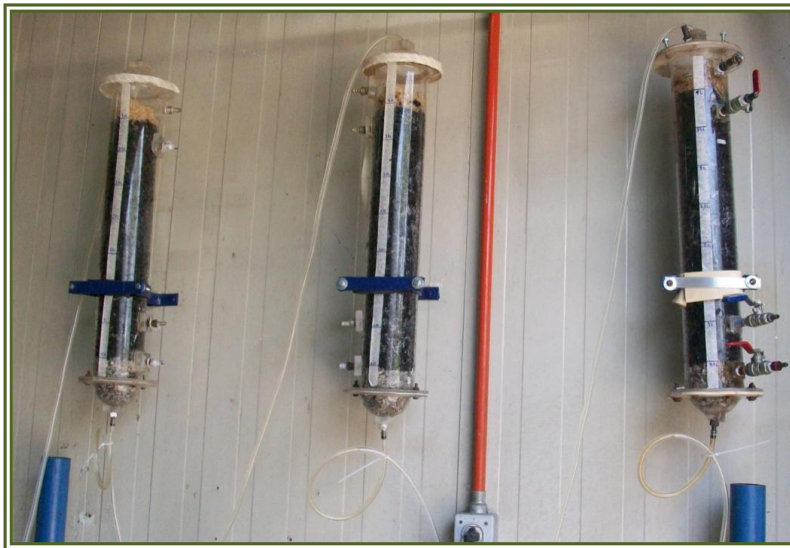
### 3.3.2 Humedales artificiales, parámetros de operación

Los sistemas utilizados son de tipo sub-superficial con flujo horizontal (HAFH), empacados con 5 cm de tezontle de 2.54 cm de diámetro y 25 cm de grava de 0.635 cm de diámetro, en los que se plantaron tres ejemplares de la especie vegetal conocida como “Cuna de Moisés” (*Spathiphyllum wallisii*). Los humedales se construyeron con cajas agrícolas de 72 cm de largo, 34 cm de alto y 38 cm de ancho (Figura 3.5).



**Figura 3.5** Diagrama esquemático del reactor empacado tipo humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial

Desde el inicio los HAFH operaron con un TRH igual a 0.021 d, con un flujo de alimentación de 2.5 L/d. Los tiempos de residencia hidráulicos cortos no proveen el período adecuado para la degradación de los contaminantes (EPA, 1988), razón por la cual este tiempo de residencia alteró el desempeño de los humedales. Además, no operaban manteniendo la zona radicular húmeda, lo que hizo que las hidrófitas murieran, ya que la salida estaba por el fondo y no tenía sifón para mantenerlos inundados (Guido-Zárate, 2006). Las **Figuras 3.6 y 3.7**, muestran los sistemas experimentales, biofiltros y humedales en funcionamiento.



**Figura 3.6** Biofiltros en operación



**Figura 3.7** Humedales artificiales en operación

## 3.4 Operación y seguimiento del sistema experimental

### 3.4.1 Arranque

Con la finalidad de iniciar la aclimatación de los sistemas ante la recepción del agua residual textil, la experimentación inició con la alimentación a los sistemas con agua residual municipal (AR municipal), obtenida del influente de la planta de tratamiento de aguas residuales del IMTA.

Posteriormente, se hizo la dilución al 10% de agua de medio blanqueo en AR municipal, la del 10% de agua de baño de teñido en AR municipal y la mezcla de las dos anteriores para la alimentación de los sistemas.

### 3.4.2 Operación

Los puntos de muestreo de los sistemas se indican en la **Tabla 3.4**, conforme a la **Figura 3.3**.

**Tabla 3.4** Puntos de muestreo de los sistemas

|                   | <b>Tipo de Agua empleada</b>            | <b>Biofiltro</b> | <b>Biofiltro - HAFH</b>   | <b>HAFH</b> | <b>Influente</b> |
|-------------------|---|------------------|---------------------------|-------------|------------------|
| <b>Módulo I</b>   | Agua residual de medio blanqueo         | BMB= E1          | BHMB= E2                  | HMB=E3      | IMB              |
| <b>Módulo II</b>  | Agua residual de baño de teñido         | BBT= E4          | BHBT= E5                  | HBT= E6     | IBT              |
| <b>Módulo III</b> | Mezcla de aguas residuales              | BMA= E7          | BHMA= E8                  | HMA= E9     | IMA              |
|                   | <b>Total de unidades experimentales</b> | 3 biofiltros     | 3 biofiltros+ 3 humedales | 3 humedales |                  |

El programa de muestreo y los parámetros de control analizados para medir el desempeño de los reactores se presentan en la **Tabla 3.5**.



**Tabla 3.5** Parámetros de seguimiento y programa de muestreo

| <b>Parámetro</b>                          | <b>Frecuencia</b> |
|---|-------------------|
| pH  | Diario            |
| Temperatura °C                            | Diario            |
| Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Diario            |
| DQO (mg/L)                                | Diario            |
| Color (mg/L)                              | Diario            |
| Color verdadero (UPt/Co)                  | Diario            |
| NT  | 2/Semana          |
| N-NH <sub>4</sub>                         | 2/Semana          |
| N-NO <sub>3</sub>                         | 2/Semana          |

### 3.5 Diseño experimental

En el presente experimento el objetivo fue comparar tres sistemas (HAFH, biofiltro y combinación de ambos) para el tratamiento de tres diferentes tipos de agua residual de la industria textil distribuidos en tres módulos (AR medio blanqueo, AR baño de teñido, mezcla de ambas) y, de esta forma, saber si el desempeño de alguno de los sistemas es mejor o el de los tres son iguales entre sí para el tratamiento de un determinado tipo de agua.

Con tal fin, se hicieron las comparaciones entre los distintos sistemas de tratamientos en los tres módulos con base en el diseño completamente al azar (en adelante, DCA). Se consideró cada módulo por separado. En cada uno se investigó el efecto de los tres sistemas de tratamiento empleados (humedal, biofiltro, biofiltro-HAFH) sobre la remoción de DQO, concentración de colorante y color aparente y verdadero. En este tipo de diseño se supone que el único factor que influye de manera significativa sobre las variables de respuesta (DQO, concentración de colorante y color aparente y verdadero), es el mismo sistema de tratamiento en sí.

De acuerdo con el diseño completamente al azar, DCA, las variables consideradas en el experimento se enuncian en la **Tabla 3.6**.

### 3.6 Análisis estadístico

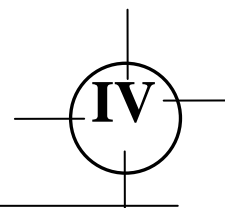
Al emplear un DCA, las comparaciones de tratamientos necesarias para cumplir con el objetivo planteado, se hicieron mediante la aplicación de un análisis de varianza a cada módulo, para cada una de las variables de respuesta estudiadas. El análisis de varianza, ANDEVA (ANOVA en inglés), señala la diferencia que deben tener las medias entre sí para concluir que hay un efecto de los tratamientos o que los tratamientos son diferentes.

El análisis de varianza se realizó después de haber sometido los datos experimentales a una serie de pruebas de discordancia con el objeto de evaluar su confiabilidad y repetibilidad. La aplicación de las pruebas de discordancia se hizo utilizando el programa DODESYS (Discordant Outlier<sup>7</sup> Detection and Elimination System) recomendado por Verma (2005). El análisis estadístico se presenta completo en el Anexo B.

**Tabla 3.6** Diseño experimental

|   |  |
|---|--|
| Factor estudiado                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Efecto de cada sistema de tratamiento sobre la remoción de DQO, concentración de colorante, color aparente y verdadero</li> </ul> |
| Factores de diseño o variables controlables   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ TRH</li> <li>✓ Caudal empleado</li> </ul>   |
| Factores de ruido o variables no controlables | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Temperatura</li> <li>✓ Conductividad eléctrica</li> <li>✓ pH</li> </ul>   |
| Variables de respuesta                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ DQO</li> <li>✓ Concentración de color</li> <li>✓ Color aparente y verdadero</li> </ul>  |
| Tratamientos                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Humedal</li> <li>✓ Biofiltro</li> <li>✓ Biofiltro-humedal</li> </ul>  |

<sup>7</sup> Outlier (Discordant Outlier Detection): En estadística, un “outlier” es una observación que está distante numéricamente del resto de los datos



---

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 4.1 Caracterización de las aguas residuales en estudio

Se realizaron barridos espectrofotométricos a la solución madre (solución preparada con las concentraciones originales de los colorantes que se usan en el teñido de color “Black Jack 1491”), así como a las diluciones de ésta, encontrando que la longitud de onda a la que se registra la máxima absorbancia es de 601nm. Los resultados del barrido espectrofotométrico se muestra en el Anexo A.

Se caracterizó el agua residual del baño de teñido. Los resultados se presentan en la **Tabla 4.1**. En la misma tabla se incluye la caracterización de la solución madre, preparada en el laboratorio para la cuantificación de las concentraciones de colorante en las muestras tomadas en los sistemas en estudio, así como la del agua residual proveniente de la planta de tratamiento de aguas del IMTA. El agua de medio blanqueo fue la que se empleó en un 10% con 90% de AR municipal de la planta de tratamiento del IMTA para alimentar el módulo I. El agua proveniente del baño de teñido fue la que se empleó en una dilución al 10% para alimentar el módulo II. En el módulo III se alimentó una mezcla de las dos aguas residuales ya diluidas que entraban a los primeros dos módulos, en una proporción 50:50.

La caracterización de las tres aguas residuales alimentadas a los sistemas se muestra en la **Tabla 4.2** Los datos experimentales completos se presentan en el Anexo A2.

**Tabla 4.1** Parámetros físico-químicos de los efluentes en estudio

| Parámetro                       | Agua de medio blanqueo | Baño de colorante | Agua residual municipal del IMTA | Solución madre |
|---------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------|
| pH                              | 11.1 ± 0.28            | 12.1 ± 0.32       | 7.8 ± 0.5                        | 5 ± 0.12       |
| Temperatura (°C)                | 80 ± 3                 | 60 ± 3            | 25.8 ± 1                         | 26 ± 1         |
| Conductividad eléctrica (mS/cm) | 1128 ± 115             | 10089 ± 1122      | 674 ± 56                         | 4.70 ± 3       |
| DQO (mg/L)                      | 4540 ± 565             | 2663 ± 326        | 113 ± 6                          | 7417 ± 872     |
| DBO (mg/L)                      | 1698 ± 332             | 239 ± 47          | 100 ± 4                          | N.d.           |
| Relación DBO/DQO                | 0.37 ± 0.05            | 0.09 ± 0.02       | 0.88 ± 0.03                      | N.d.           |
| Color aparente U Pt/Co          | No tiene color         | 4702 ± 102        | 32 ± 9                           | 16798 ± 346    |
| N-NH <sub>4</sub> (mg/L)        | N.d.                   | 40 ± 4            | 14 ± 2                           | 314 ± 180      |
| Nitrógeno total (mg/L)          | N.d.                   | 48 ± 5            | 21 ± 4                           | 400 ± 197      |

N.d. No determinada

Se puede ver que los influentes de los sistemas tienen valores de pH variables entre sí, tendiendo a los valores básicos, en especial en donde se utilizan colorantes, como son el módulo II y III, lo que indica que la adición de colorantes y/o las sustancias auxiliares que los acompañan, basifican el agua residual.

La temperatura es un factor que no se controló a lo largo del experimento, aún así, se tomaron lecturas al respecto y se puede observar que la variación entre los tres módulos es mínima.

**Tabla 4.2** Características de las aguas residuales en estudio (influentes)

| Parámetro | Agua residual de | Agua residual de | Mezcla de aguas |
|-----------|------------------|------------------|-----------------|
|-----------|------------------|------------------|-----------------|

|   | <b>medio blanqueo<br/>(módulo I)</b> | <b>baño de colorante<br/>(módulo II)</b> | <b>residuales<br/>(módulo III)</b> |
|---|--------------------------------------|--|------------------------------------|
| pH  | 7.58 ± 0.34                          | 9.27 ± 0.45                              | 8.83 ± 0.39                        |
| Temperatura (°C)                                    | 26 ± 1.23                            | 26 ± 1                                   | 26 ± 1                             |
| Conductividad eléctrica<br>(mS/cm)                  | 971 ± 113                            | 12509 ± 1474                             | 7181 ± 1074                        |
| DQO (mg/L)  | 459 ± 178                            | 495 ± 77                                 | 480 ± 147                          |
| Color aparente U Pt/Co                              | 51 ± 26                              | 7662 ± 3086                              | 3368 ± 1145                        |
| Color verdadero U Pt/Co                             | 50 ± 26                              | 7204 ± 3376                              | 3097 ± 1207                        |
| Concentración de colorante<br>(Amarillo S3R) (mg/L) | No tiene color                       | 149 ± 38                                 | 57 ± 12                            |
| Concentración de colorante<br>(Negro R) (mg/L)      | No tiene color                       | 193 ± 53                                 | 64 ± 18                            |
| Concentración de colorante<br>(Negro G) (mg/L)      | No tiene color                       | 147 ± 55                                 | 50 ± 24                            |
| Nitrógeno total (mg/L)                              | 67 ± 34                              | 63 ± 43                                  | 71 ± 44                            |
| N-NH <sub>4</sub> (mg/L)                            | 18 ± 8                               | 24 ± 11                                  | 22 ± 13                            |

La CE, de manera similar al comportamiento del pH, aumenta en la etapa de teñido, en donde son adicionados aditivos como cloruro de sodio, carbonato de sodio y sosa cáustica; se confirma que la presencia de estas sustancias elevan tanto el pH como la CE del agua que las contiene.

En cuanto a la DQO, en promedio, se mantienen valores semejantes en los tres módulos, lo que implica que la dilución con agua residual municipal influyó de manera considerable en la disminución de este parámetro para los dos tipos de agua principales (medio blanqueo y baño de teñido).

La similitud entre los valores de color aparente y color verdadero muestra que no existen sólidos en el agua residual en cantidad considerable que puedan afectar el color de los influentes; por tanto, los valores registrados de este parámetro se deben principalmente a la presencia de los colorantes.

Con relación a la concentración original de colorantes, para los tres diferentes colorantes que conforman la mezcla “Black Jack 1491”, se puede observar que esta concentración en el baño de teñido se ve menos afectada por la dilución realizada con AR municipal, que por la mezcla que incluye el agua de medio blanqueo, lo anterior puede ser debido a la presencia de sustancias oxidantes, como el peróxido de hidrógeno, en el medio blanqueo.

El nitrógeno total se mantiene en promedio con valores semejantes, el agua del módulo III presenta valores un poco más elevados, no pasa así con el nitrógeno amoniacal, que presenta valores mayores en el módulo II.

## 4.2 Desempeño de los sistemas

En la **Tabla 4.3** se condensan los resultados obtenidos en cuanto a remoción de los distintos parámetros medidos para cada sistema de tratamiento en cada módulo.

La tabla contiene información acerca de las remociones alcanzadas al medir la DQO, concentración de colorante, color aparente y color verdadero. Estos valores se distribuyen en tres columnas, una para cada sistema de tratamiento, (HAFH, biofiltro, biofiltro-humedal) y se agrupan por módulos. En la tabla aparece el valor máximo y el mínimo de la remoción lograda en cada sistema, así como su valor promedio para cada módulo.

De manera general, en la tabla se puede observar lo que se confirma en el análisis estadístico, que para el módulo I y principalmente, para el II, existe una diferencia significativa entre los tratamientos, encontrando que los sistemas de tratamiento 2 y 3, es decir, el biofiltro y la combinación, son estadísticamente iguales en los diferentes parámetros medidos, y ambos tienen una diferencia significativa comparados con el sistema conformado sólo por un humedal. El módulo III presenta en general, semejanza entre los tratamientos, en este módulo es en donde el desempeño de los sistemas es el menor, lo que indica que los dos tipos de aguas residuales (medio blanqueo y baño de teñido) son más difíciles de tratar cuando están mezclados, que cuando se someten a tratamiento de manera individual.

**Tabla 4.3** Resumen del desempeño de los sistemas

| <i>Condensado de resultados de la remoción alcanzada por los diferentes sistemas en cada módulo</i> |         |           |                   |
|---|---------|-----------|-------------------|
| <b>DQO</b>  |         |           |                   |
| <b>Remoción (%)</b>   |         |           |                   |
| Sistema   | Humedal | Biofiltro | Biofiltro-humedal |
| <b>Módulo I</b>   |         |           |                   |
| Valor máximo  | 93.00   | 99.00     | 100.00            |
| Valor mínimo  | 48.00   | 83.00     | 92.00             |
| Promedio  | 77.00   | 94.00     | 97.00             |
| Desviación est.   | 12.00   | 4.00      | 2.00              |
| <b>Módulo II</b>  |         |           |                   |
| Valor máximo  | 73.00   | 80.00     | 80.00             |
| Valor mínimo  | 7.00    | 25.00     | 27.00             |
| Promedio  | 27.00   | 58.00     | 62.00             |
| Desviación est.   | 15.00   | 14.00     | 14.00             |
| <b>Módulo III</b>   |         |           |                   |
| Valor máximo  | 69.00   | 89.00     | 90.00             |
| Valor mínimo  | 11.00   | -1.25     | 0.00              |
| Promedio  | 43.00   | 41.00     | 45.00             |
| Desviación est.   | 14.00   | 30.00     | 27.00             |
| <b>Concentración de colorante -Negro ciba R</b>   |         |           |                   |
| <b>Remoción (%)</b>   |         |           |                   |
| <b>Módulo II</b>  |         |           |                   |
| Valor máximo  | 39      | 88        | 91                |
| Valor mínimo  | 0.3     | 40        | 42                |
| Promedio  | 17      | 66        | 70                |
| Desviación est.   | 13      | 15        | 16                |
| <b>Módulo III</b>   |         |           |                   |
| Valor máximo  | 100     | 82        | 83                |
| Valor mínimo  | 0       | 0.6       | 0                 |
| Promedio  | 13      | 19        | 25                |
| Desviación est.   | 25      | 24        | 27                |
| <b>Color aparente</b>   |         |           |                   |
| <b>Remoción (%)</b>   |         |           |                   |
| <b>Módulo II</b>  |         |           |                   |
| Valor máximo  | 72      | 89        | 88                |
| Valor mínimo  | 0       | 3         | 2                 |
| Promedio  | 8       | 60        | 58                |
| Desviación est.   | 16      | 19        | 20                |
| <b>Módulo III</b>   |         |           |                   |
| Valor máximo  | 76      | 71        | 57                |
| Valor mínimo  | 0       | 0         | 0.2               |
| Promedio  | 12      | 14        | 12                |
| Desviación est.   | 22      | 21        | 19                |
| <b>Concentración de colorante -Negro ciba G</b>   |         |           |                   |
| <b>Remoción (%)</b>   |         |           |                   |
| Sistema   | Humedal | Biofiltro | Biofiltro-humedal |
| <b>Módulo II</b>  |         |           |                   |
| Valor máximo  | 57.00   | 95.00     | 94.00             |
| Valor mínimo  | 0.87    | 32.00     | 42.00             |
| Promedio  | 24.00   | 66.00     | 66.00             |
| Desviación est.   | 14.00   | 17.00     | 17.00             |
| <b>Módulo III</b>   |         |           |                   |
| Valor máximo  | 71.00   | 78.00     | 78.00             |
| Valor mínimo  | 0.24    | 0.27      | 0.46              |
| Promedio  | 14.00   | 20.00     | 18.00             |
| Desviación est.   | 18.00   | 26.00     | 21.00             |
| <b>Concentración de colorante - Amarillo ciba S3R</b>   |         |           |                   |
| <b>Remoción (%)</b>   |         |           |                   |
| <b>Módulo II</b>  |         |           |                   |
| Valor máximo  | 42      | 75        | 96                |
| Valor mínimo  | 0.3     | 35        | 34                |
| Promedio  | 15      | 55        | 57                |
| Desviación est.   | 12      | 13        | 16                |
| <b>Módulo III</b>   |         |           |                   |
| Valor máximo  | 41      | 70        | 71                |
| Valor mínimo  | 0.0     | 0.2       | 0.6               |
| Promedio  | 9       | 22        | 25                |
| Desviación est.   | 10      | 22        | 23                |
| <b>Color verdadero</b>  |         |           |                   |
| <b>Remoción (%)</b>   |         |           |                   |
| <b>Módulo II</b>  |         |           |                   |
| Valor máximo  | 63      | 90        | 94                |
| Valor mínimo  | 0       | 0         | 0.3               |
| Promedio  | 10      | 62        | 64                |
| Desviación est.   | 17      | 22        | 19                |
| <b>Módulo III</b>   |         |           |                   |
| Valor máximo  | 100     | 72        | 100               |
| Valor mínimo  | 0       | 0         | 0                 |
| Promedio  | 23      | 10        | 14                |
| Desviación est.   | 35      | 18        | 24                |

## 4.2.1 Módulo I: Agua residual de medio blanqueo

A continuación se muestran los resultados de operación y desempeño del módulo I (ver **Figura 3.1**), que trabajó con agua de medio blanqueo usando como co-sustrato AR municipal del IMTA. En el Anexo A.2 se presentan todos los datos experimentales que respaldan las siguientes gráficas y tablas.

### 4.2.1.1 Parámetros de campo (pH, temperatura, CE y SDT)

Como se aprecia en la **Tabla 4.4** los parámetros de campo no se ven fuertemente afectados en los sistemas empleados en el módulo I. Dicha Tabla muestra los valores correspondientes a los parámetros de campo, en ellos se observa que no hay una variación considerable entre los datos de entrada a los sistemas y los de salida, a excepción del pH que se ve elevado en los humedales y en el biofiltro reducido. Las variaciones en los resultados conservan una estabilidad, únicamente la conductividad en la combinación de sistemas presenta una variación significativa.

**Tabla 4.4.** Parámetros de campo (módulo I)

|                        | Influyente | Ef. humedal | Ef. biofiltro | Ef. biof-hum |
|------------------------|------------|-------------|---------------|--------------|
| pH                     | 8 ± 0.34   | 8 ± 0.24    | 7 ± 0.43      | 9 ± 0.21     |
| Temperatura (°C)       | 26 ± 1     | 25 ± 1      | 26 ± 1        | 26 ± 1       |
| Conductividad<br>μS/cm | 1003 ± 150 | 913 ± 166   | 1009 ± 190    | 894 ± 260    |
| SDT (mg/L)             | 491 ± 65   | 491 ± 65    | 494 ± 86      | 469 ± 86     |

### 4.2.1.2 DQO

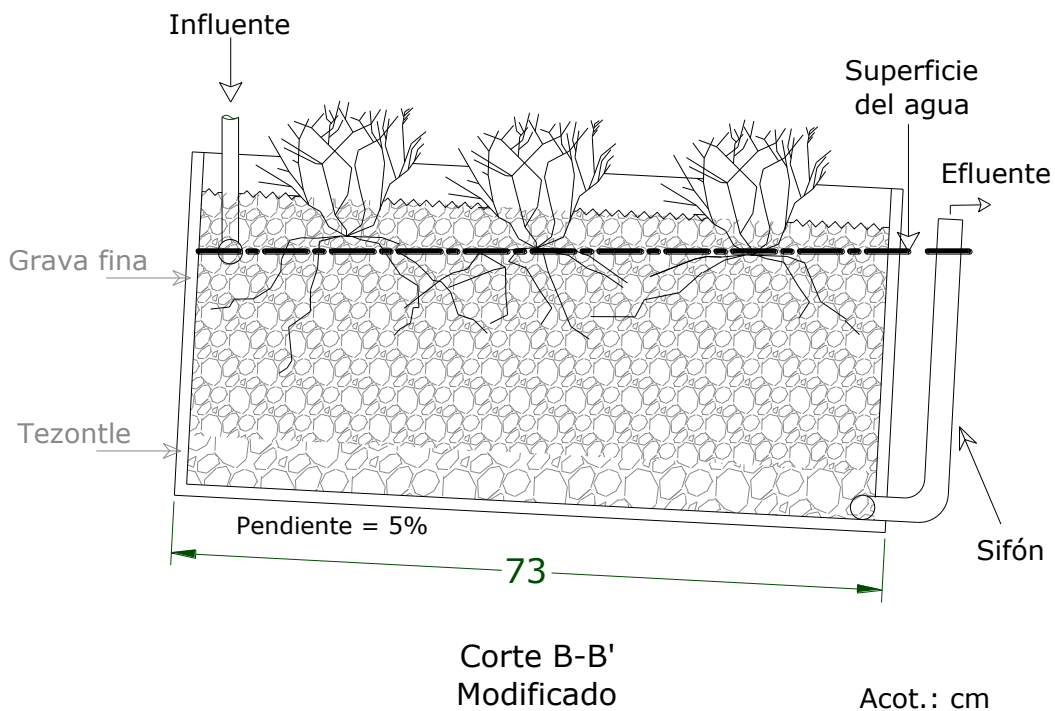
Como se observa en las **Gráficas 4.1** y **4.2** la concentración de DQO disminuyó considerablemente a través de los tres sistemas de tratamiento, siendo el humedal el sistema que logró menores remociones, reportando en promedio remociones alrededor del 76%, para el biofiltro se reportó una remoción del 94% y la combinación de ambos sistemas se reportó igual a 97%. El desempeño del biofiltro y de la combinación de los sistemas es similar. Es en el análisis estadístico en donde se confirma que no existe diferencia



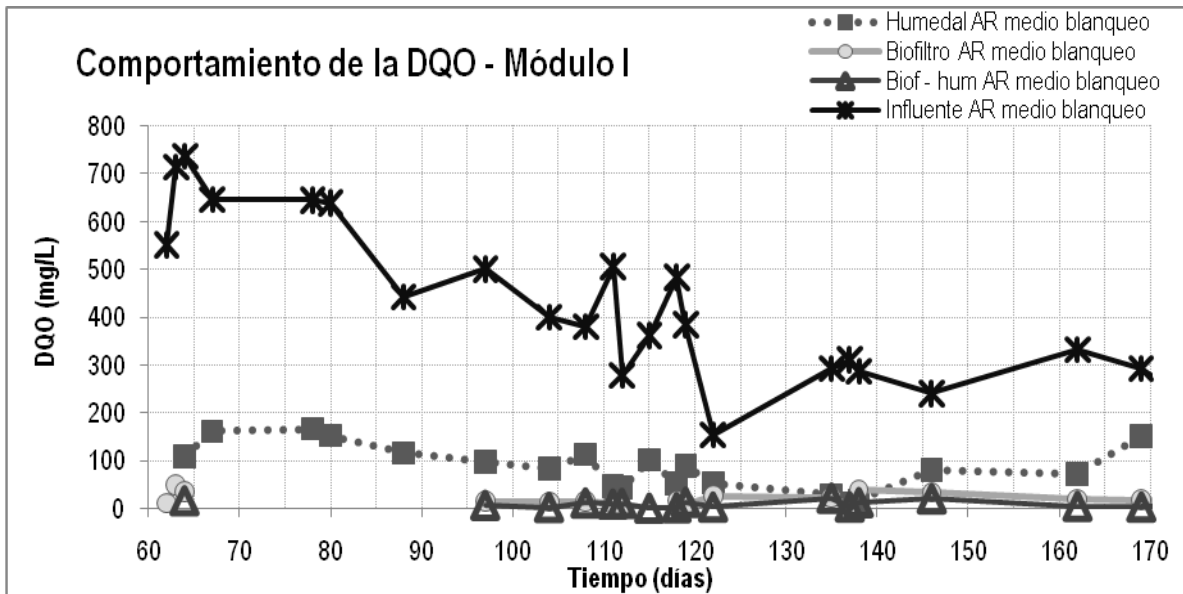
significativa entre estos sistemas y sí la hay entre cada uno de éstos comparados con el humedal individual ( $P < 0.01$ ).

Se determina, entonces, que el sistema que mejor desempeño tuvo es el biofiltro individual, pues la aportación del humedal en la combinación es mínima, en comparación con la del biofiltro. Recordando que el humedal no operó adecuadamente (estaba prácticamente seco) esto era esperable. Habrá que plantear un nuevo experimento a futuro, donde sí opere adecuadamente para corroborar su bondad.

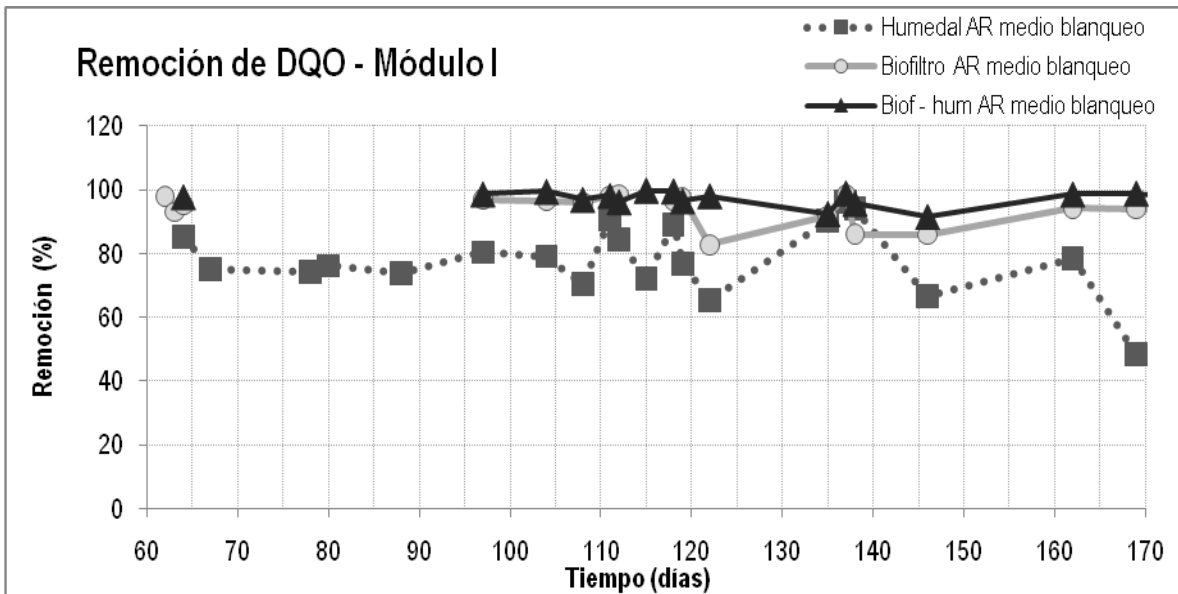
Si el HAFH se hubiera operado conforme al tiempo de residencia de diseño, que debería ser de 1.26 días (determinado conforme a la literatura), las plantas hubieran estado inundadas y el desempeño de los humedales habría reportado mejores resultados (ver **Figura 4.1** – modificación de la **Figura 3.5** – con el sistema de sifón que lo mantendría inundado). El TRH de 1.26 días conduciría a un caudal de 22.22 L/d.



**Figura 4.1** Corte del humedal artificial con sistema de sifón



**Gráfica 4.1** Concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo I, para la dilución de agua de medio blanqueo con AR municipal (mg/L)



**Gráfica 4.2** Remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo I, para la dilución de agua de medio blanqueo con AR municipal (%)

### 4.2.1.3 N<sub>T</sub> y N-NH<sub>4</sub>

De las **Gráficas 4.3a y 4.3b** es notorio que el influente del nitrógeno total es considerablemente mayor que el influente de nitrógeno amoniacal, ya que se presenta básicamente su forma orgánica y el N-NH<sub>3</sub> es una fracción del total. El valor del nitrógeno total disminuye en una proporción importante. De esta manera el nitrógeno total a través del biofiltro se ve disminuido con una remoción del 68±24%. En la combinación de los sistemas (biofiltro-humedal), la remoción es similar a la anterior con 62±32%, a diferencia del HAFH que presenta una remoción de 46±39%. Un comportamiento semejante se presenta con el nitrógeno amoniacal, en donde los sistemas de biofiltración y combinado remueven hasta 89±13 y 87±17% y el HAFH remueve 65±25%.

## 4.2.2 Módulo II: Agua residual de baño de teñido

### 4.2.2.1 Parámetros de campo

De los valores presentados en la **Tabla 4.5** se observa que el agua de este módulo (Ver **Figura 3.1**) tiene un pH más alcalino. El valor del pH desciende en los tres sistemas, y de mejor forma en el biofiltro, proporcionando un pH neutro. La temperatura permanece constante tanto en el influente como en los efluentes de los sistemas. La conductividad y los sólidos disueltos totales se ven reducidos al ser sometidos a los sistemas de tratamiento, con mejores resultados de remoción en el biofiltro.

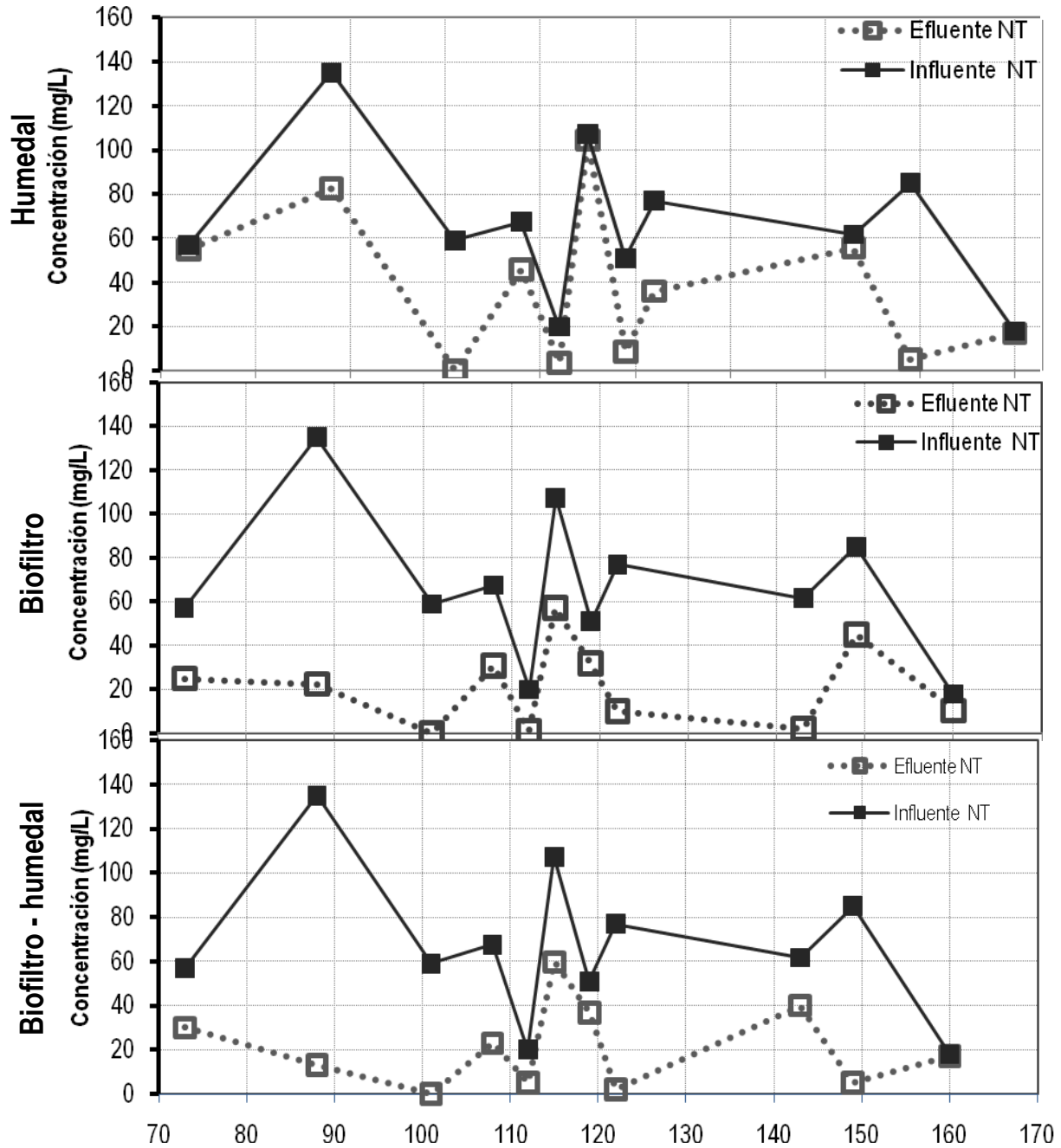
**Tabla 4.5** Parámetros de campo (módulo II)

|                        | Influente    | Ef. humedal  | Ef. biofiltro | Ef. biof-hum |
|------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| pH                     | 9 ± 0.64     | 9 ± 0.37     | 7 ± 0.50      | 9 ± 0.30     |
| Temperatura (°C)       | 26 ± 1       | 26 ± 1       | 26 ± 1        | 26 ± 1       |
| Conductividad<br>μS/cm | 12190 ± 1899 | 11143 ± 2352 | 8598 ± 3467   | 8344 ± 3510  |
| SDT (mg/L)             | 6611 ± 1277  | 5900 ± 1822  | 4659 ± 1946   | 4525 ± 1917  |

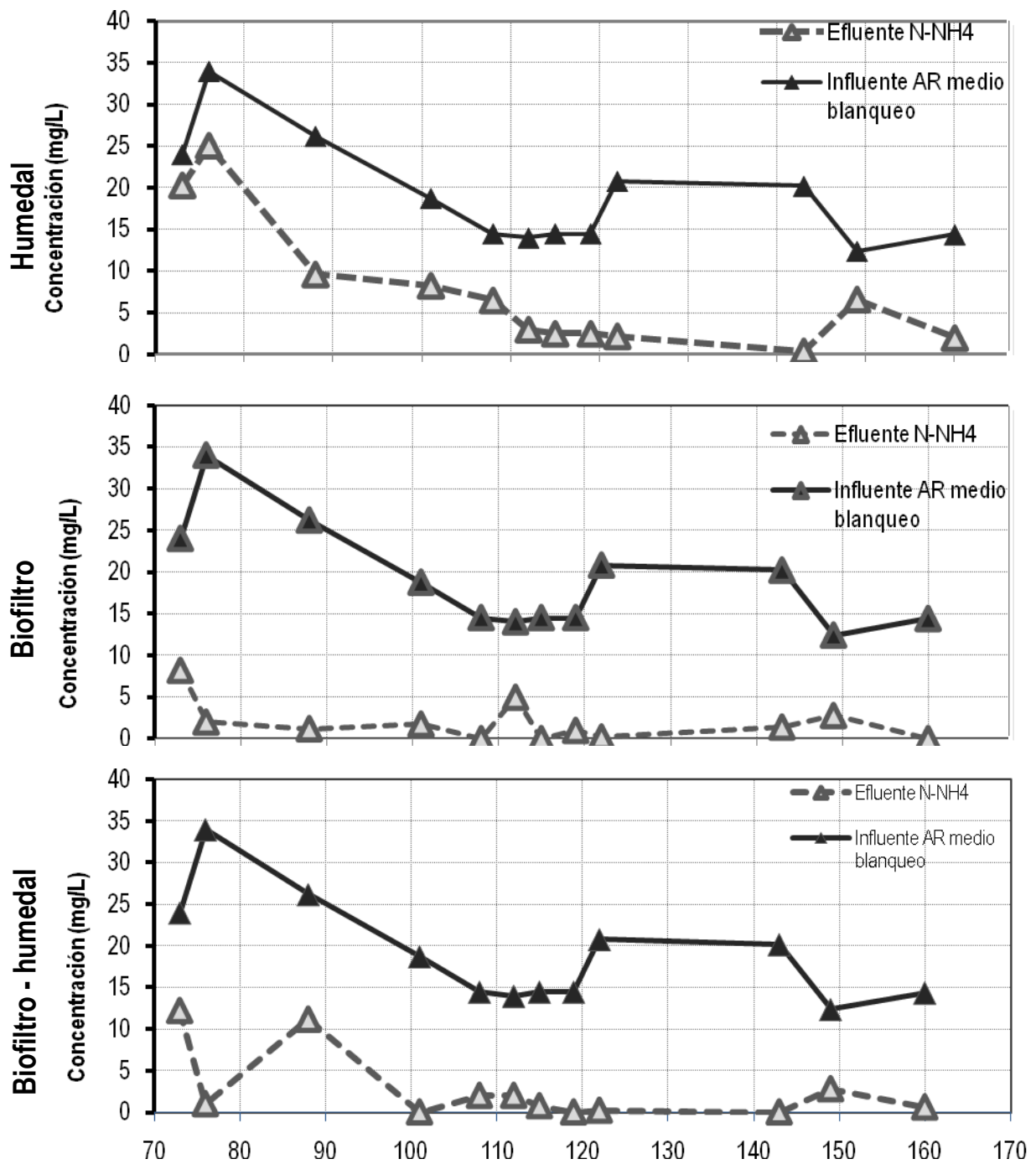
### 4.2.2.2 DQO

Con el AR de baño de teñido, los sistemas muestran un comportamiento más inestable que en el módulo I (agua de medio blanqueo), y las remociones son menores en éstos,

alcanzando el humedal, apenas una remoción del 27%, el biofiltro de 58% y la combinación de ambos, un 62% (ver **Gráficas 4.4 y 4.5**).

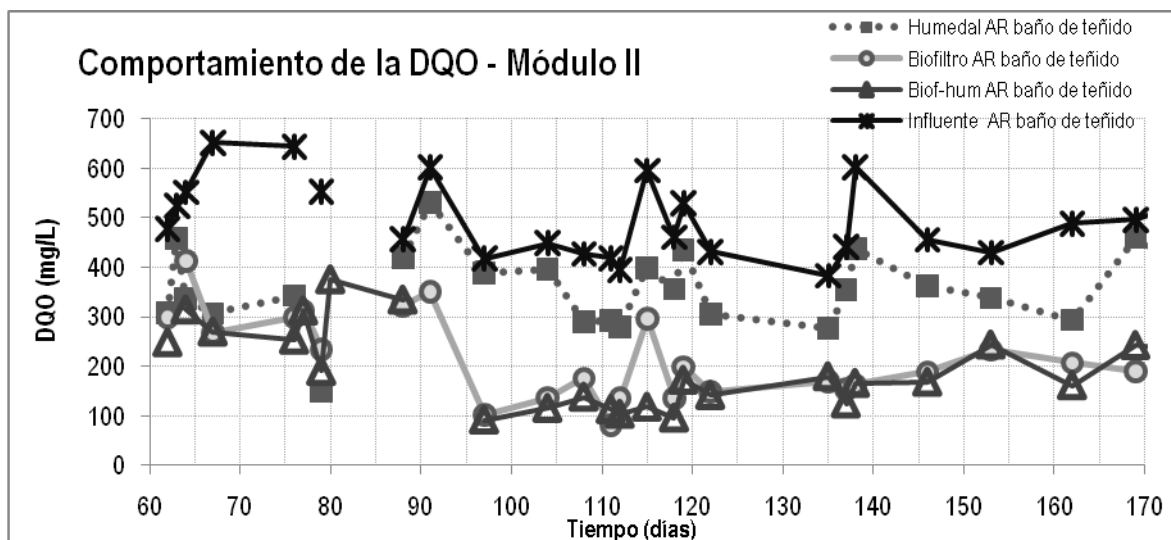


**Gráfica 4.3a** Comportamiento de nitrógeno total en los sistemas del módulo I para la dilución de agua de medio blanqueo con AR municipal (mg/L)

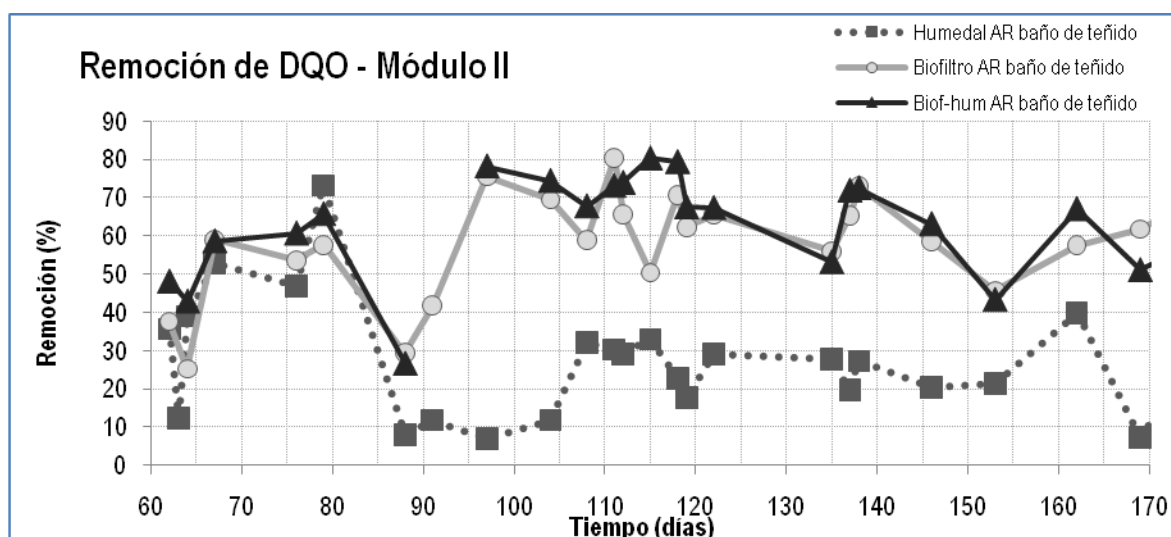


**Gráfica 4.3b** Comportamiento de nitrógeno amoniacal en los sistemas del módulo I para la dilución de agua de medio blanqueo con AR municipal (mg/L)

El humedal, como se esperaba, es nuevamente el que menor remoción reporta y al igual que en el módulo I, existe una semejanza entre el biofiltro y la combinación, siendo el biofiltro el que mejores remociones presenta. Es importante notar que en este módulo el agua contiene colorantes y algunos aditivos, lo que disminuye la eficiencia de los tres sistemas en comparación con el módulo I, en el que el agua contiene sólo aditivos



**Gráfica 4.4** Concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)



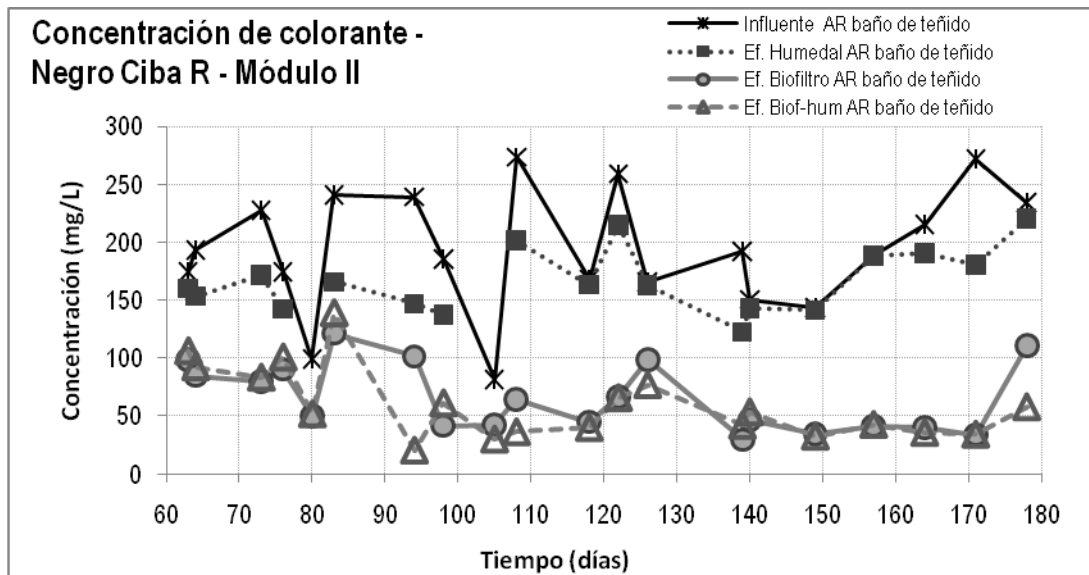
**Gráfica 4.5** Remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)

### 4.2.2.3 Concentración de colorante

De acuerdo con la mezcla de colorantes original que conforman el color “Black Jack 1491”, se midió la concentración de cada uno de los tres colorantes que conforman esta mezcla (Negro Ciba R, Negro Ciba G, Amarillo Ciba S3R), tanto para el módulo II, en dónde se trabajó con la dilución hecha con el baño de teñido; como para el módulo III, en el que se mezcló el baño de teñido diluido en agua residual municipal con el agua de medio blanqueo diluida en agua residual municipal.

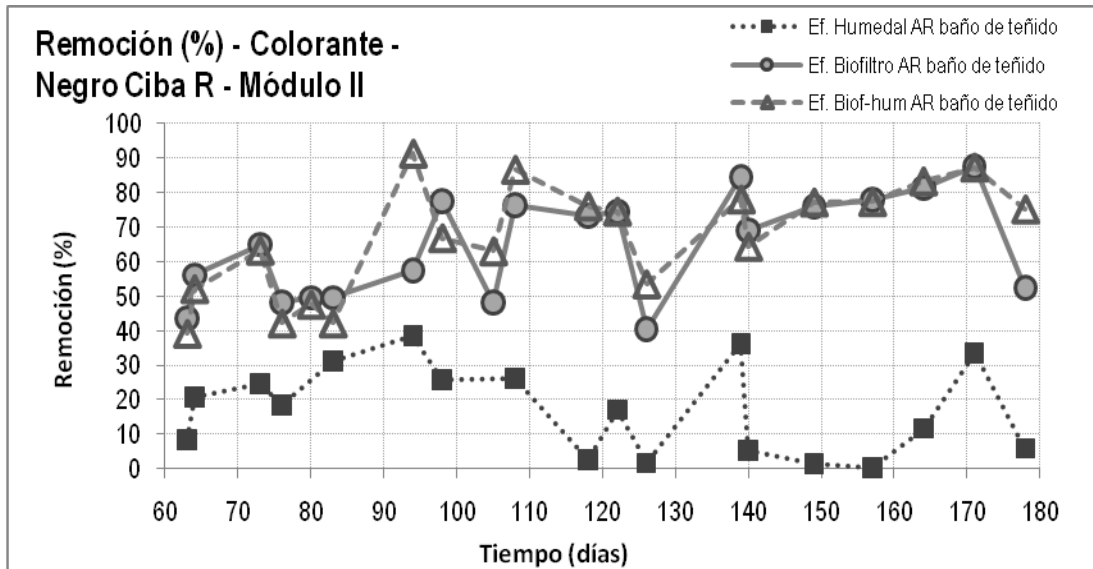
Las **Gráficas 4.6 a 4.11** muestran el comportamiento de cada colorante en los sistemas de tratamiento. En ellas se aprecia que el comportamiento de cada colorante fue muy parecido en cada sistema, de tal forma que los tres colorantes en el influente tuvieron una tendencia semejante, en especial el Negro Ciba R y el Amarillo Ciba S3R.

Del mismo modo, se puede ver que el HAFH tuvo una baja eficiencia al generar las más bajas remociones a lo largo de todo el experimento. Éstas fueron desde un mínimo registrado del 0.31% (Amarillo y Negro R), hasta un 57%, como máximo, que se alcanzó en el caso del colorante Negro G.

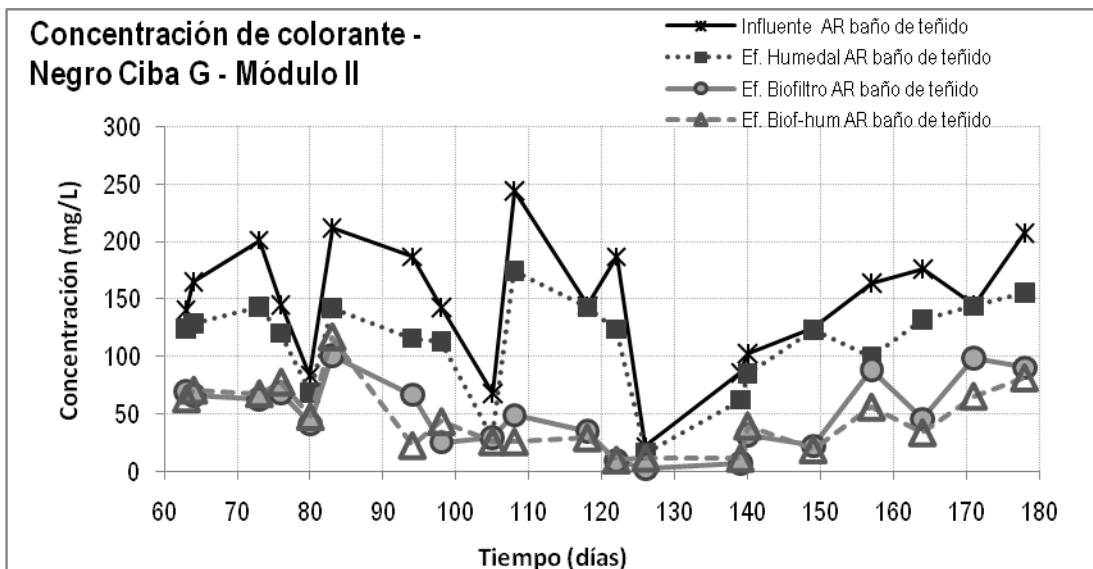


**Gráfica 4.6** Concentración del colorante Negro Ciba R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)

En el biofiltro y la combinación biofiltro-HAFH, se alcanzaron las mejores remociones, con 62% y 64%, respectivamente. Los valores mínimos registrados de la remoción de concentración de colorante se dan con el colorante Amarillo, y los máximos, con el colorante Negro G. Todo lo anterior se puede apreciar con mayor detalle en el condensado de las remociones obtenidas (**Tabla 4.3**).

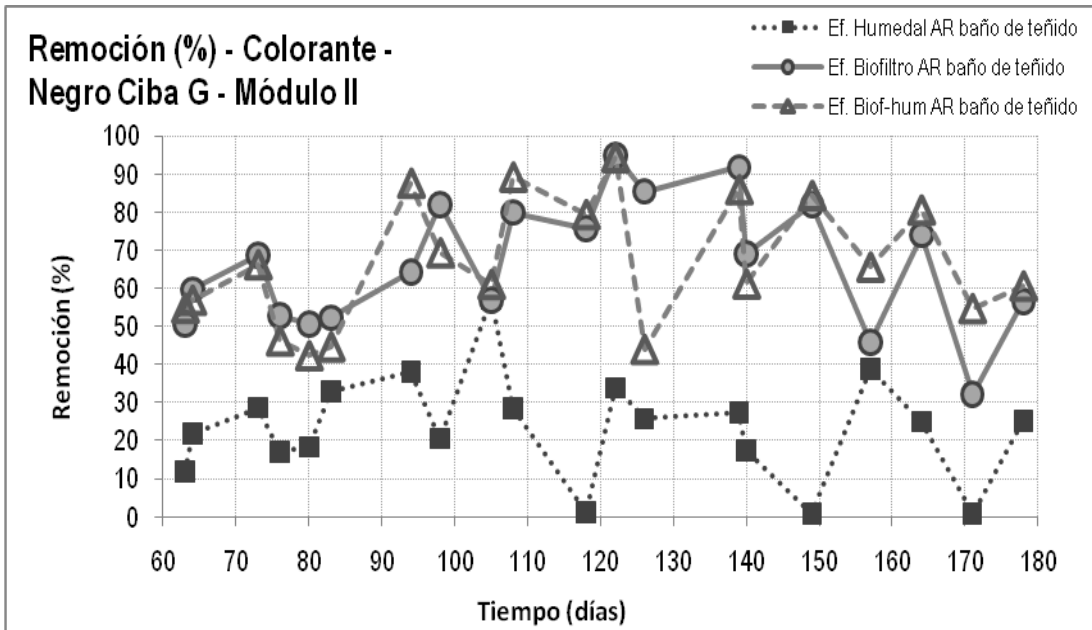


**Gráfica 4.7** Remoción del colorante Negro Ciba R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)

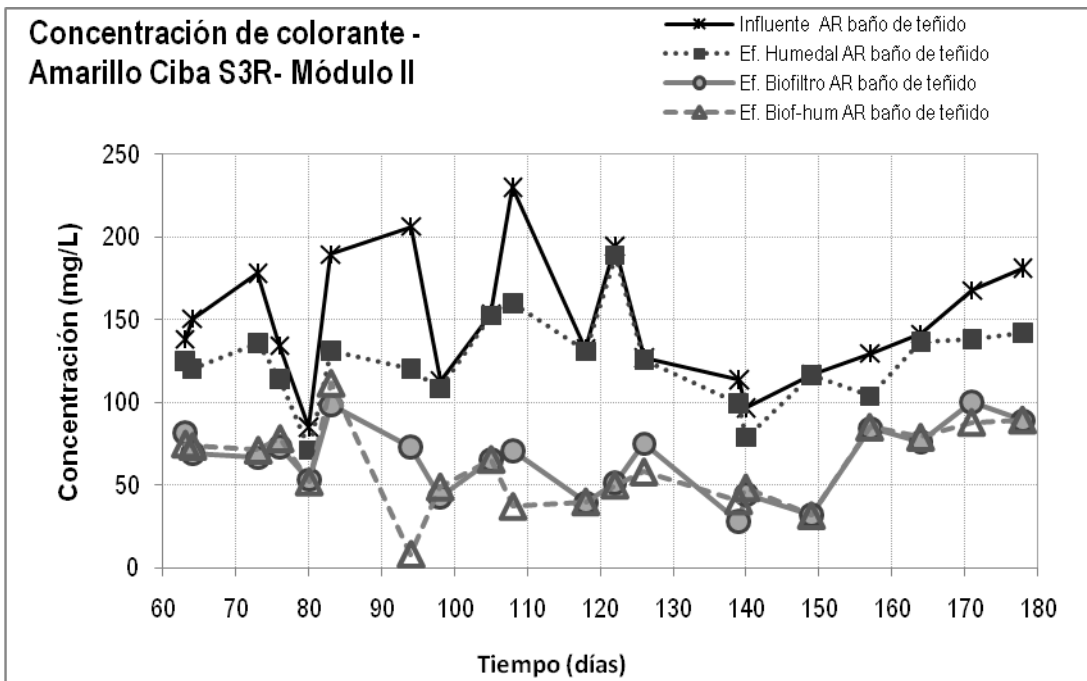


**Gráfica 4.8** Concentración del colorante Negro Ciba G en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)

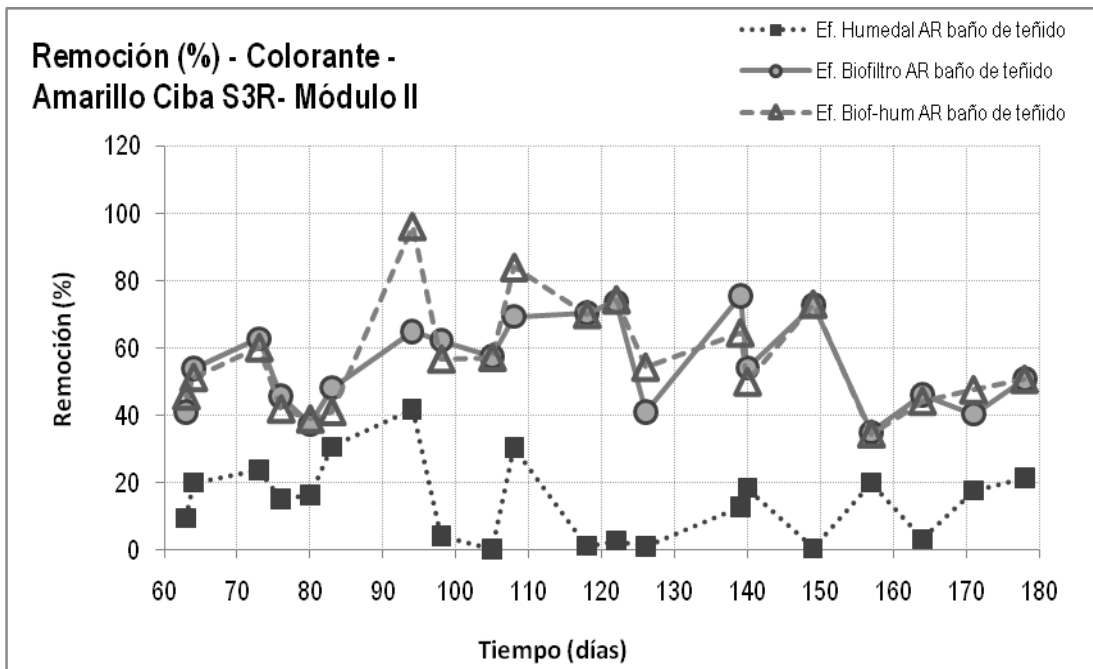




**Gráfica 4.9** Remoción del colorante Negro Ciba G en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)



**Gráfica 4.10** Concentración del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)



**Gráfica 4.11** Remoción del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)

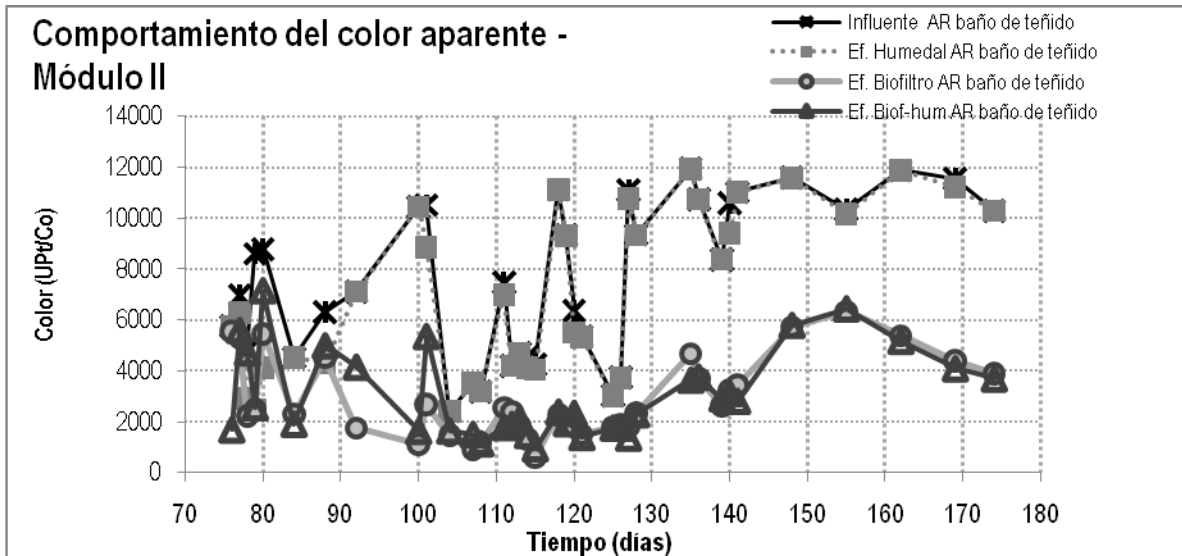
#### 4.2.2.4 Color aparente y color verdadero

Con respecto al color aparente y verdadero, se observa que, debido a su mal diseño, el humedal individual removi6, en promedio, 9% de la concentraci6n de los colorantes.

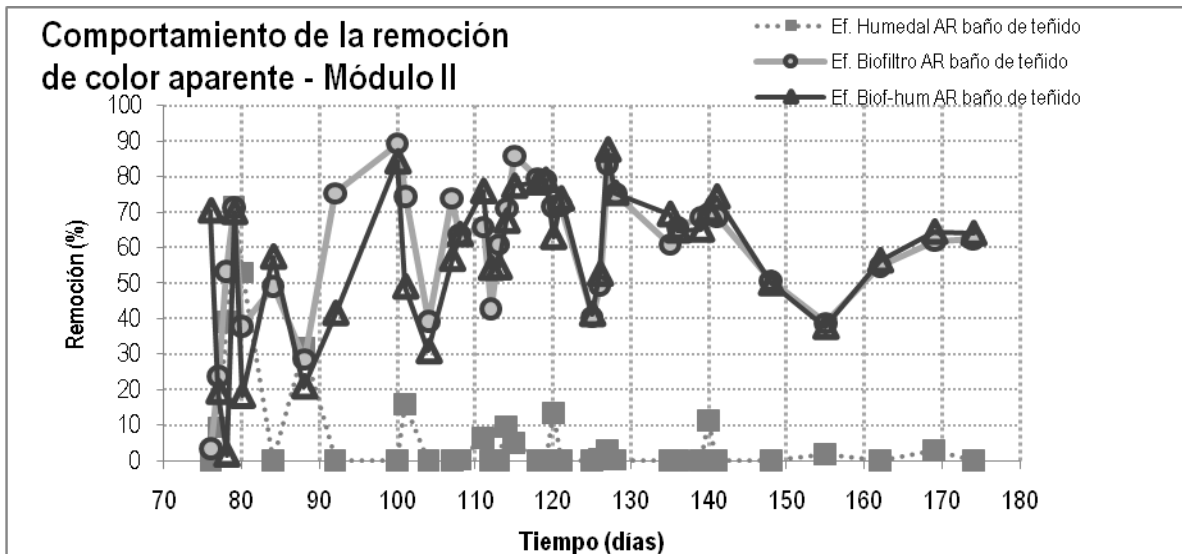
El biofiltro logr6 remociones del 61% y la combinaci6n de los dos sistemas logr6 el mismo porcentaje.

Debido al error de dise1o del HAFH solamente el biofiltro pudo remover color. Este se1alamiento es apoyado por el an1lisis estadístico.

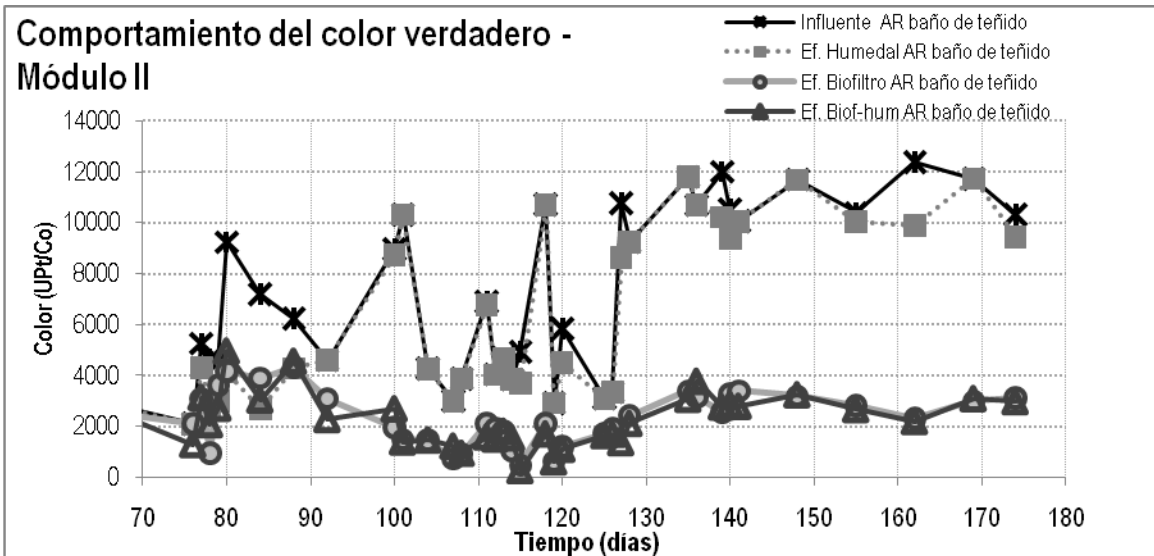
De las Gráficas 4.12 a la 4.15 se observa lo referido en el p1rrafo anterior.



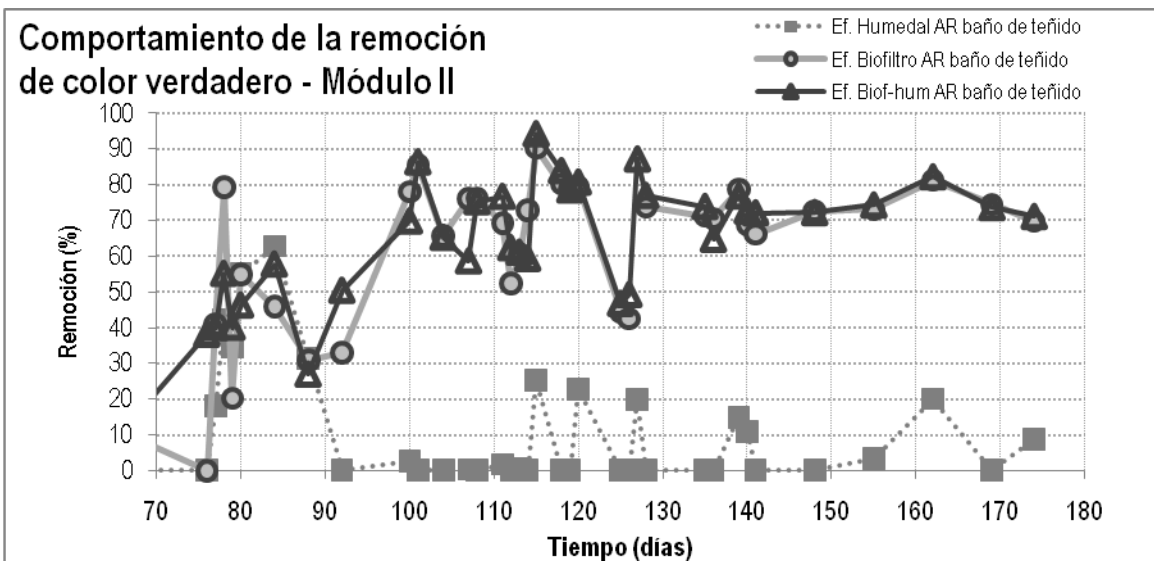
**Gráfica 4.12** Color medido como color aparente en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (U Pt/Co)



**Gráfica 4.13** Remoción de color medido como color aparente en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)



**Gráfica 4.14** Color medido como color verdadero en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (U Pt/Co)



**Gráfica 4.15** Remoción de color medido como color verdadero en el módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (%)

#### 4.2.2.5 $N_T$ y $N-NH_4$

En la **Gráfica 4.16** se observa un comportamiento constante en los tres sistemas en cuanto a nitrógeno total.

La remoción de nitrógeno total en los sistemas es semejante entre sí, al igual que la de nitrógeno amoniacal, alcanzando valores apenas por encima de cero.

En la gráfica se aprecia que el biofiltro tiene una remoción ligeramente mejor que los otros sistemas

### 4.2.3 Módulo III: mezcla de aguas residuales: sanitaria con agua de medio blanqueo y de colorantes

#### 4.2.3.1 Parámetros de campo

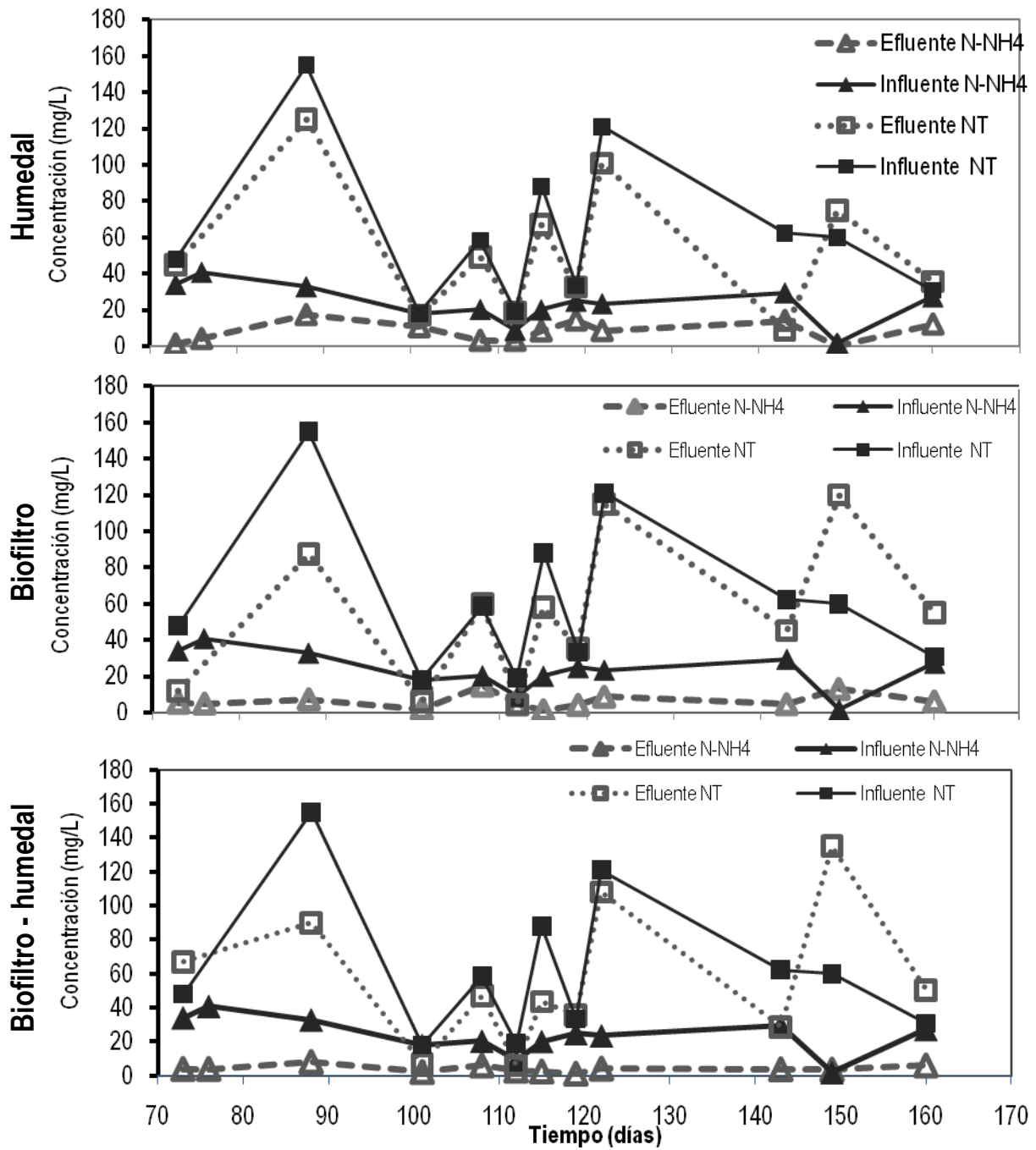
El pH y la temperatura presentan valores estables, desde el influente hasta cada uno de los sistemas de tratamiento, como se observa en la **Tabla 4.6**.

Los valores de pH en los sistemas varían alrededor de ocho, y la temperatura toma valores promedio de 25°C.

En cuanto a la conductividad y sólidos disueltos, los valores del influente aumentan al pasar por los sistemas.

**Tabla 4.6** Parámetros de campo (módulo III)

|                       | Influente   | Ef. humedal | Ef. biofiltro | Ef. biof-hum |
|-----------------------|-------------|-------------|---------------|--------------|
| pH                    | 9 ± 0.53    | 8 ± 0.36    | 7 ± 0.47      | 9 ± 0.21     |
| Temperatura (°C)      | 26 ± 1      | 26 ± 1      | 26 ± 1        | 26 ± 1       |
| Conductividad (µS/cm) | 7094 ± 1597 | 6931 ± 1032 | 10253 ± 2990  | 10129 ± 3228 |
| SDT (mg/L)            | 3817 ± 703  | 3994 ± 1152 | 5711 ± 1509   | 5782 ± 1761  |



**Gráfica 4.16** Comportamiento de nitrógeno total y amoniacal en los sistemas del módulo II para la dilución de agua de baño de teñido con AR municipal (mg/L)

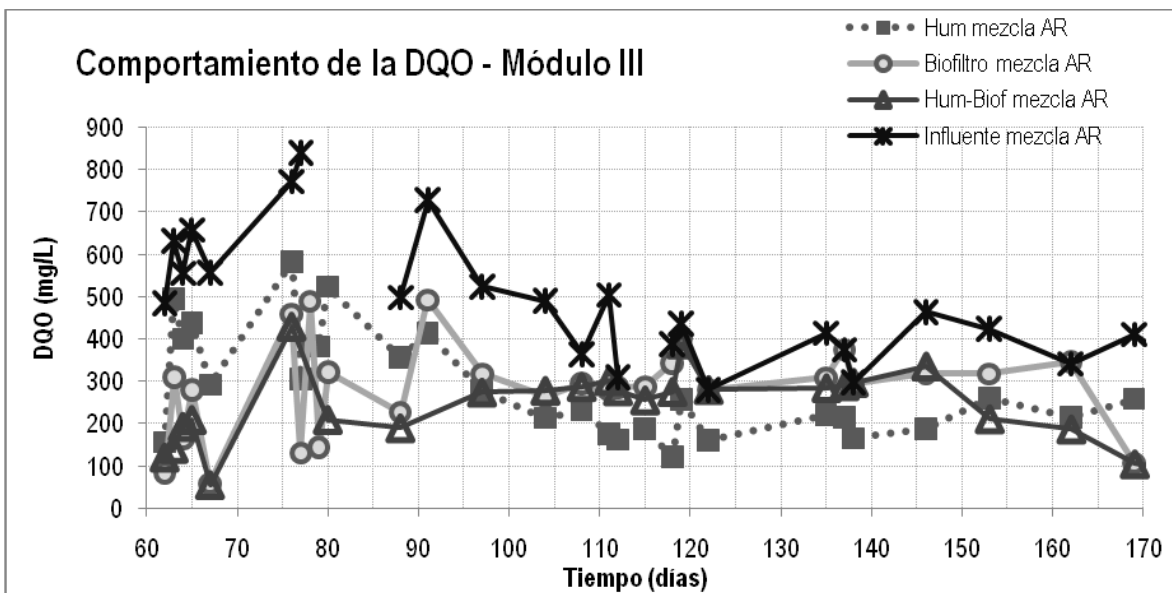
### 4.2.3.2 DQO

Durante los primeros 30 días de alimentación con agua residual industrial, se distingue cierta inestabilidad en las concentraciones registradas para contaminantes disueltos medidos como DQO; las remociones son menores en los tres sistemas que las observadas en los otros dos módulos, alcanzando el humedal 43%, el biofiltro 40% y la combinación 46%.

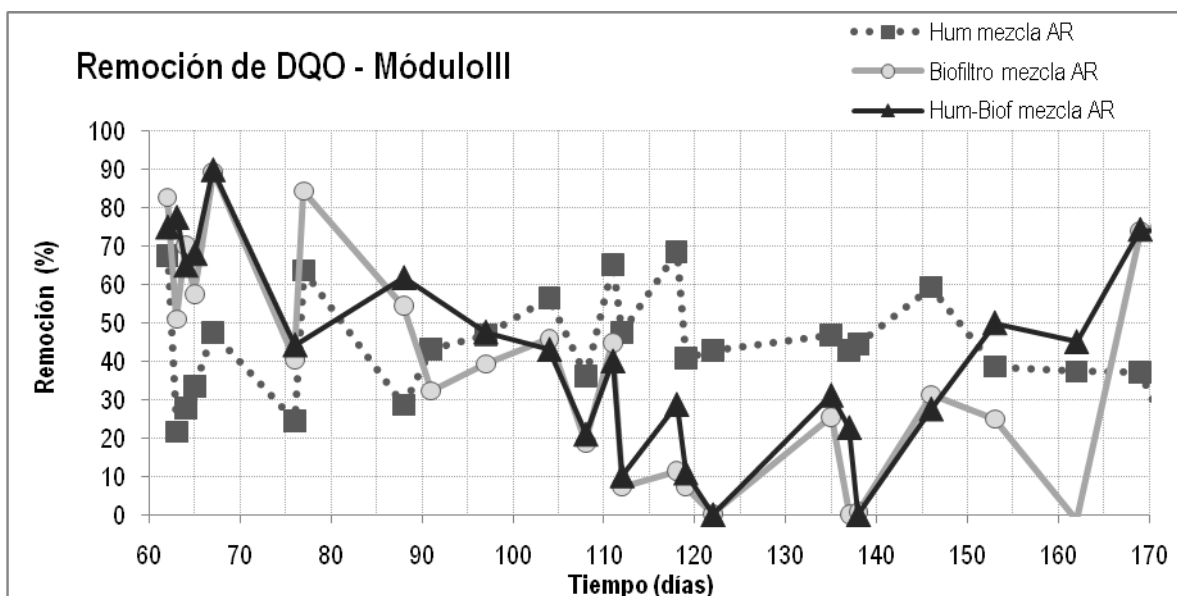
En este módulo es interesante ver que las remociones son similares en los tres sistemas, de la misma forma el análisis estadístico conduce a determinar que no existe una diferencia significativa entre los sistemas.

Esto podría llevar a determinar que la mezcla de los dos tipos de agua (medio blanqueo y baño de teñido) originan un funcionamiento distinto en los sistemas, y con eficiencias menores que si se tratan por separado.

Las **Gráficas 4.17 y 4.18** muestran el comportamiento de la DQO en este módulo



**Gráfica 4.17** Concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L)

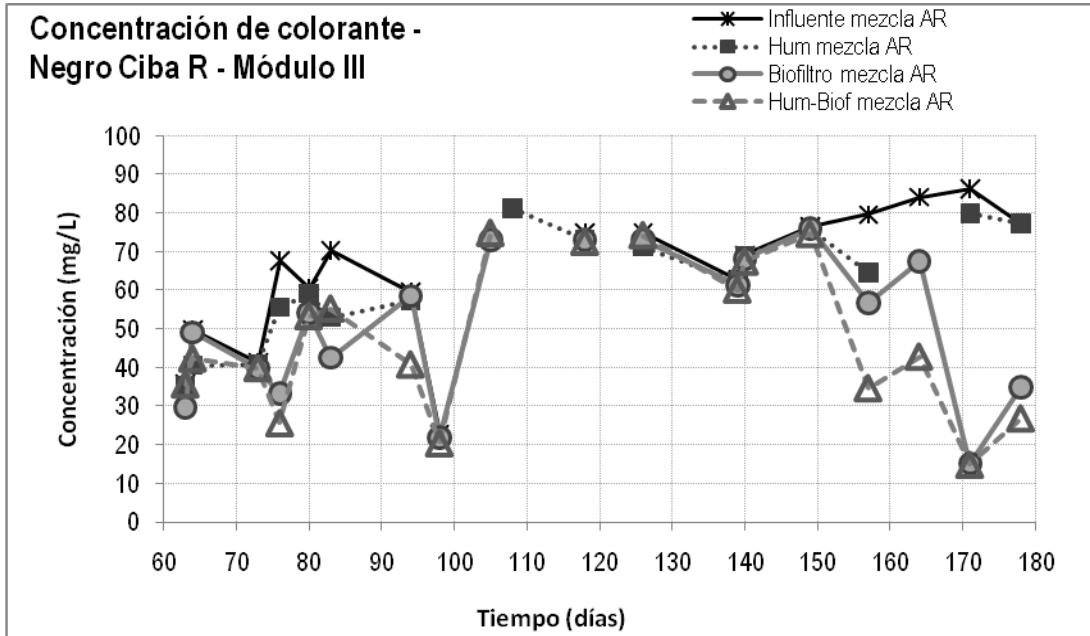


**Gráfica 4.18** Remoción de concentración de contaminantes disueltos medidos como DQO en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%)

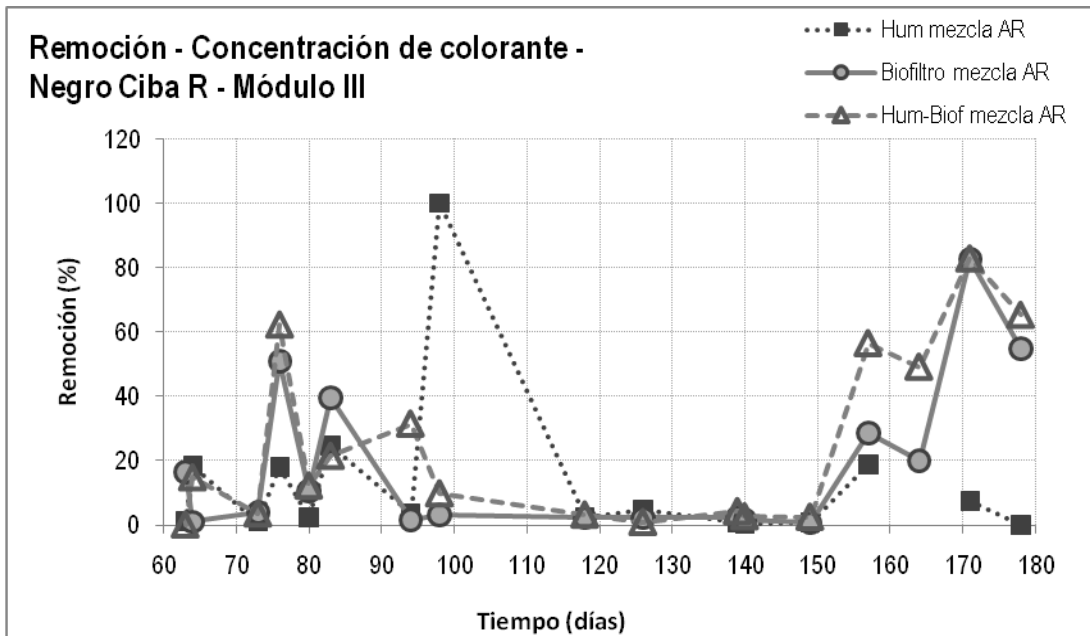
### 4.2.3.3 Concentración de colorante

Los sistemas en el módulo III se muestran con eficiencias distintas de las conseguidas en el módulo II, referente a la concentración de colorantes. Al examinar las gráficas correspondientes (**Gráfica 4.19 a 4.24**), se observan muy bajas remociones que, en algunos momentos llegaron a ser nulas. Tomando en cuenta, que los valores mínimos de remoción en todos los sistemas para los tres colorantes son muy cercanos a cero y habiendo alcanzado un valor máximo de 25% en la remoción del colorante Amarillo y el Negro R, en general, se observa un promedio de 18% en la remoción de la concentración de colorantes. Es importante hacer notar la variabilidad de los datos experimentales que se presenta en este módulo, pues así como se obtuvieron valores cercanos a cero como mínimos, se obtuvieron valores de remoción de más del 80%. Todo esto se puede observar con mejor detalle en el condensado de la **Tabla 4.3**. Esto se atribuye a que la mezcla de las AR (AR de medio blanqueo y AR de baño de teñido) lleva a cabo una serie de reacciones entre sus componentes que hacen que el AR resultante altere el desempeño uniforme de los sistemas a comparación con el desempeño del módulo I y del II.

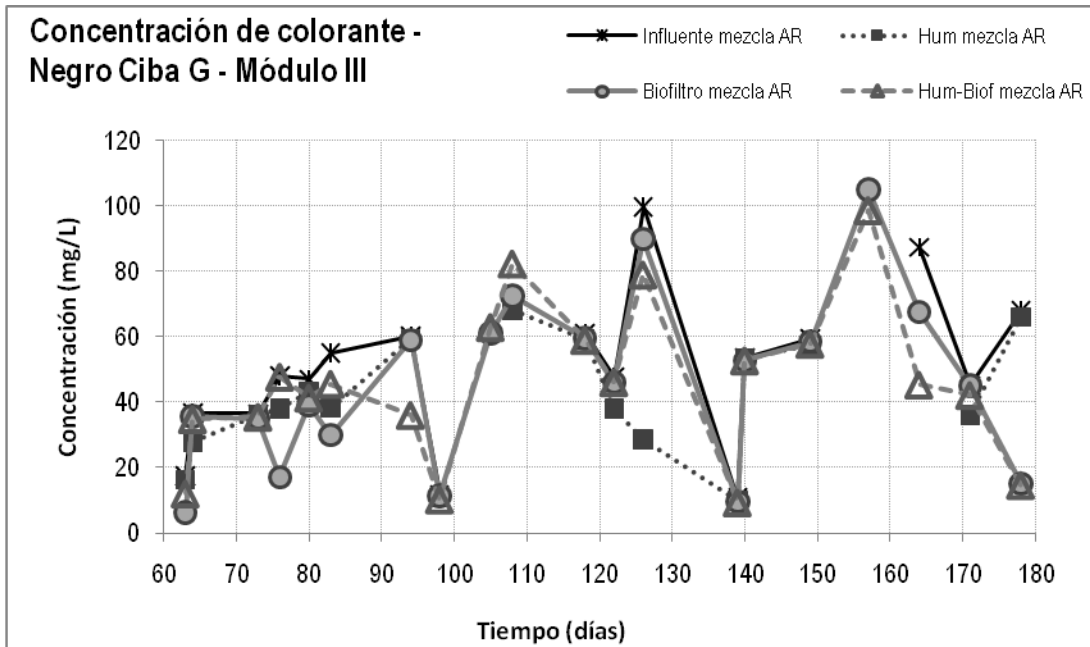




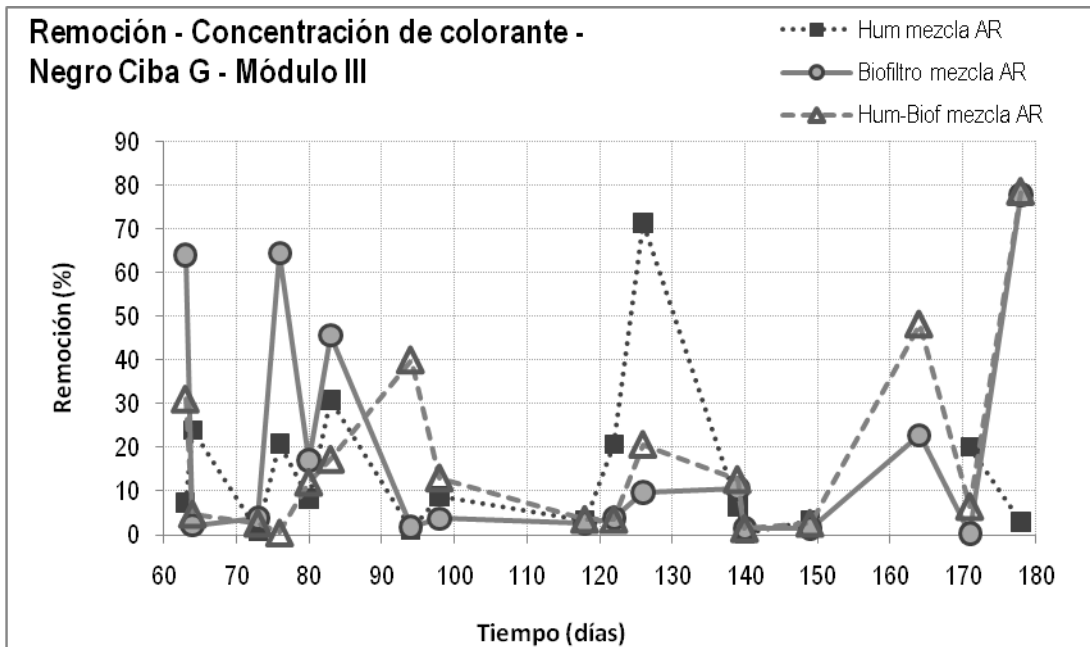
**Gráfica 4.19** Concentración del colorante Negro Ciba R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo, y agua de baño de teñido (mg/L)



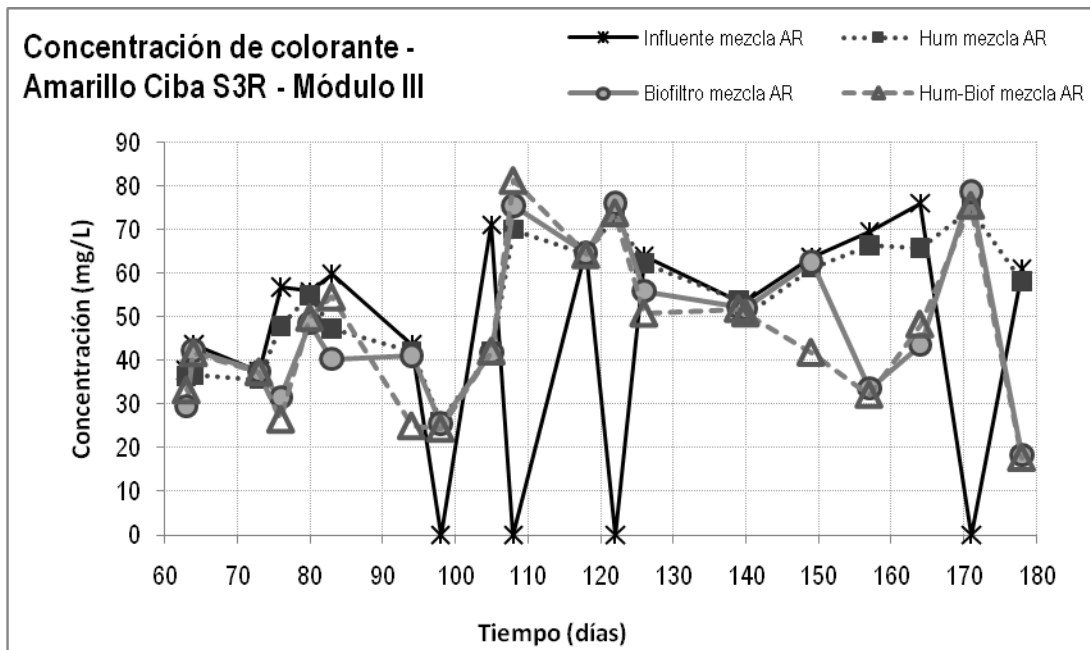
**Gráfica 4.20** Remoción de concentración del colorante Negro Ciba R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L)



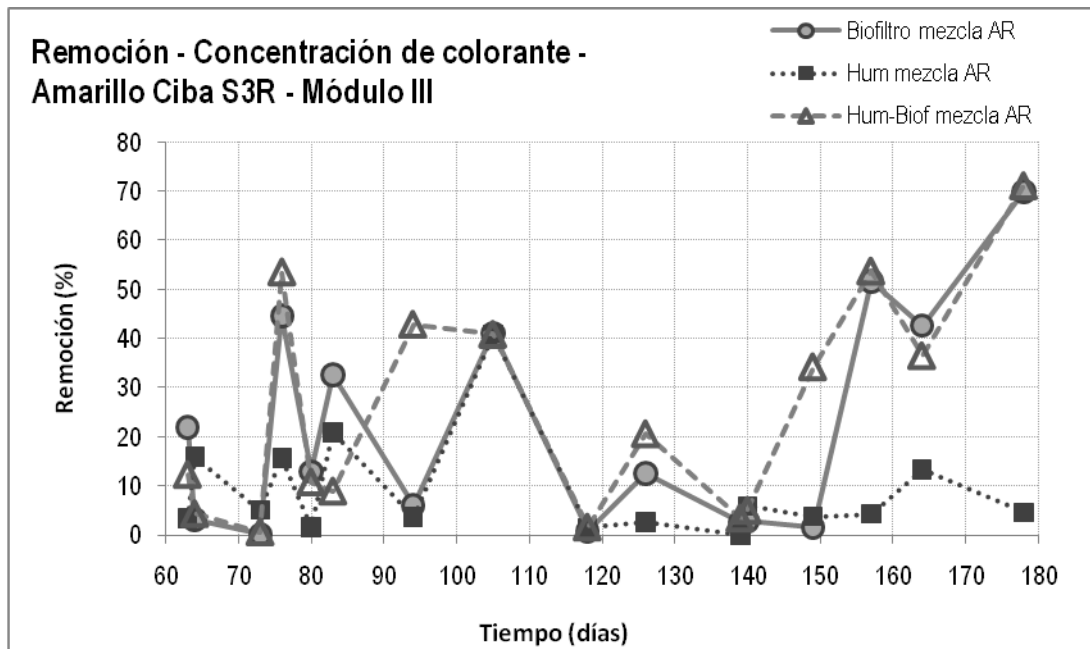
**Gráfica 4.21** Concentración del colorante Negro Ciba G en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo, y agua de baño de teñido (mg/L)



**Gráfica 4.22** Remoción de concentración del colorante Negro Ciba G en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, agua de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%)



**Gráfica 4.23** Concentración del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, agua de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L)



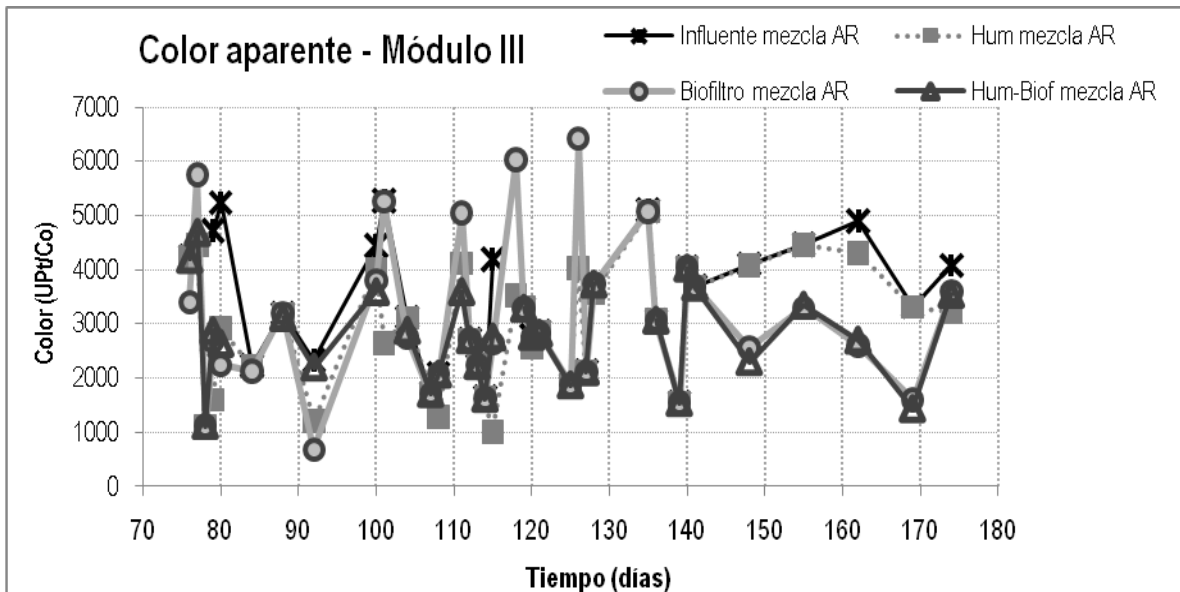
**Gráfica 4.24** Remoción de concentración del colorante Amarillo Ciba S3R en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%)

#### 4.2.3.4 Color aparente y color verdadero

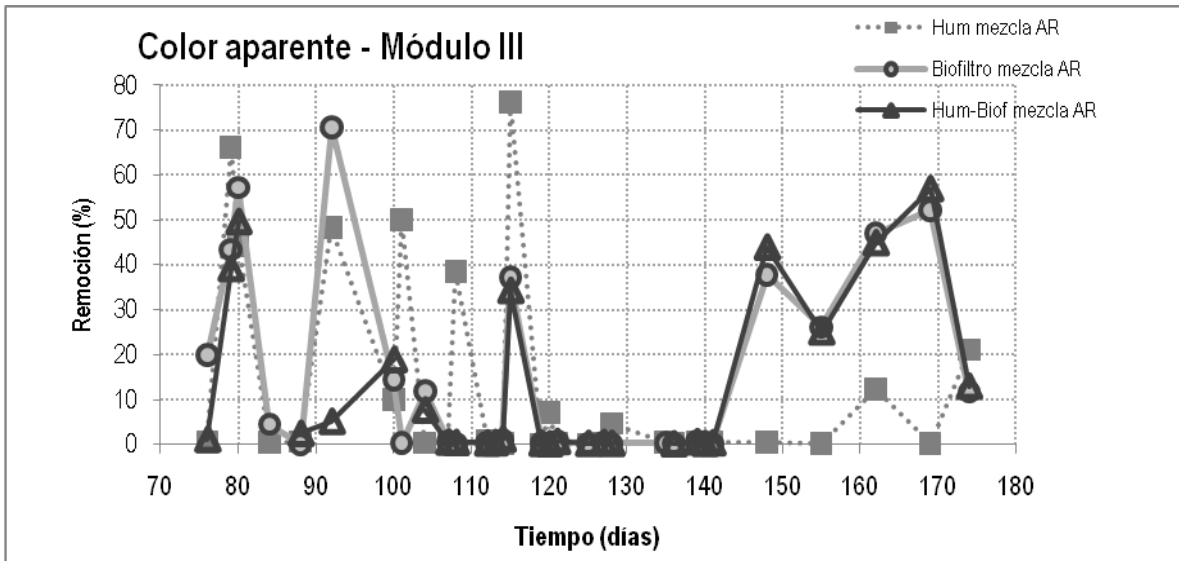
En el caso del color aparente y color verdadero en el módulo III, como lo muestran de las Gráficas 4.25 a 4.28, se genera la más baja remoción de todo el experimento.

Los valores mínimos de remoción, son prácticamente de 0% contrastado con el hecho de que algunos valores alcanzan un máximo de 70%, el valor promedio de remoción es del 14%. En cuanto a color aparente el desempeño de los sistemas es estadísticamente igual.

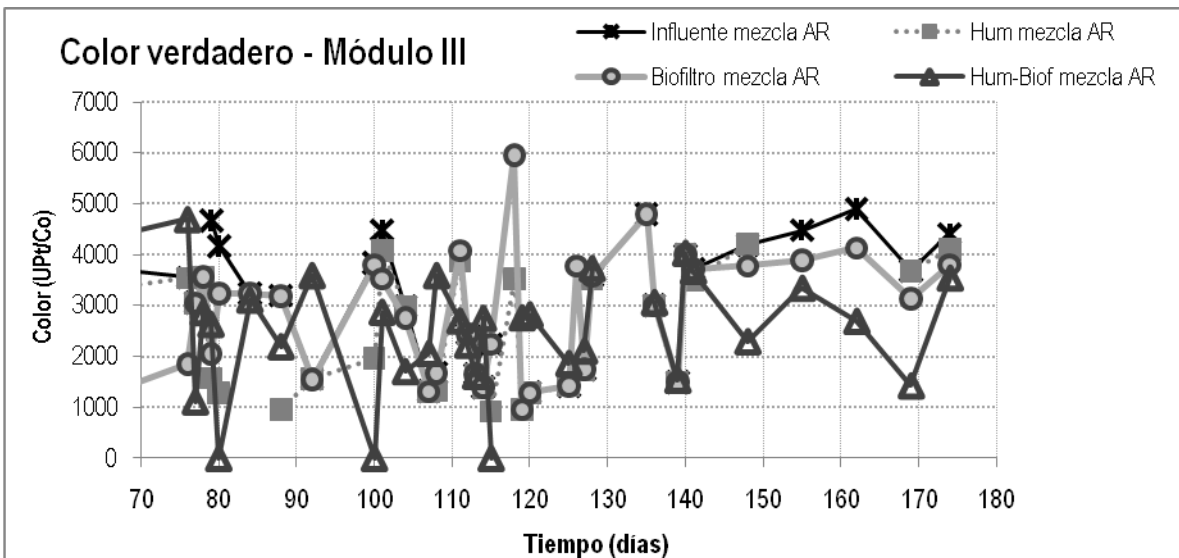
Referente al color verdadero, el promedio de remoción es de 15%. De esta observación se puede determinar nuevamente que la mezcla de los tipos de agua del módulo I y II hacen más difícil la remoción de contaminantes existentes en el agua.



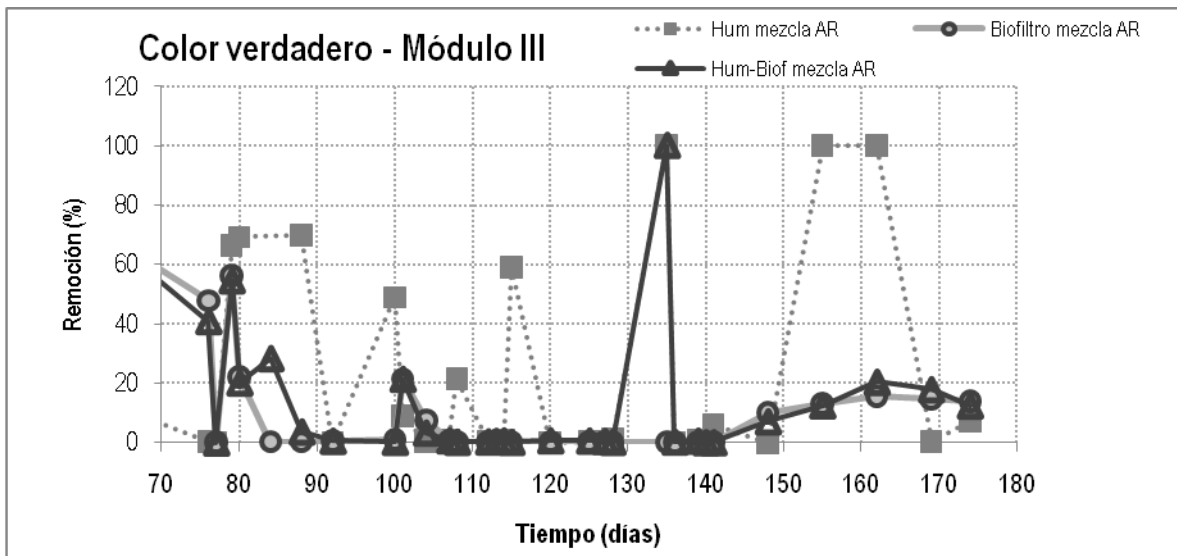
**Gráfica 4.25** Color medido como color aparente en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (U Pt/Co)



**Gráfica 4.26** Remoción de color medido como color aparente en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%)



**Gráfica 4.27** Color medido como color verdadero en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (U Pt/Co)



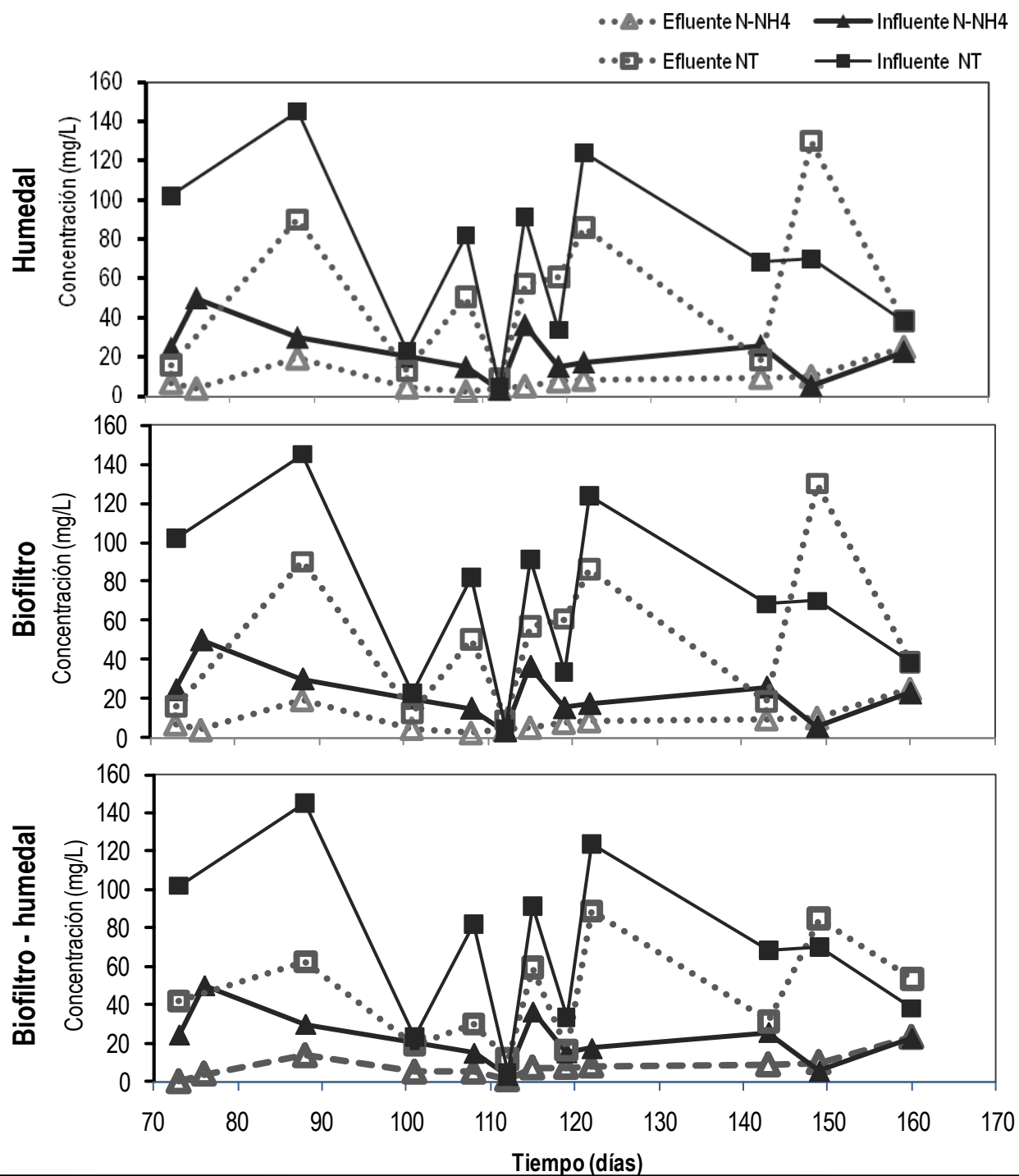
**Gráfica 4.28** Remoción de color medido como color verdadero en el módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (%)

#### 4.2.3.5 $N_T$ y $N-NH_4$

Los sistemas observados conforme al comportamiento del nitrógeno total y el nitrógeno amoniacal, como se ve en la **Gráfica 4.29**, se presentan de manera similar a los otros módulos ya analizados, a excepción de que en el módulo I el nitrógeno amoniacal es removido casi en su totalidad. En este módulo las remociones son menores que en los otros módulos. Se vuelve, entonces a marcar la disminución en la capacidad de remoción de los sistemas cuando se mezclan los tipos de aguas residuales empleados en este estudio.

### 4.3 Discusión final

La **Tabla 4.7** mostrada a continuación da una ilustración en cuanto a la influencia de los distintos tipos de agua estudiados en los sistemas de tratamiento. El módulo I (AR medio blanqueo) únicamente se estudió con base en la remoción de contaminantes disueltos medidos como DQO, observando que con este tipo de agua las remociones alcanzadas son mayores al 90% y no se encuentra mayor dificultad al tratarlas.



**Gráfica 4.29** Comportamiento de nitrógeno total y amoniacal en los sistemas del módulo III para la mezcla de agua residual sanitaria, de medio blanqueo y agua de baño de teñido (mg/L)

**Tabla 4.7** Desempeño alcanzado en cada módulo por los tres sistemas: biofiltro, HAFH, biofiltro-HAFH (promedio de los tres)

|   |                  | <b>DQO</b><br>(mg/L) | <b>Colorante</b><br><b>Amarillo</b><br>(mg/L) | <b>Colorante</b><br><b>Negro G</b><br>(mg/L) | <b>Colorante</b><br><b>Negro R</b><br>(mg/L) | <b>Color</b><br><b>aparente</b><br>(UPt/Co) | <b>Color</b><br><b>verdadero</b><br>(UPt/Co) |
|---|------------------|----------------------|---|--|--|---|--|
| <b>Módulo I</b><br><b>AR de</b><br><b>medio</b><br><b>blanqueo</b>  | Influyente       | 459±178              | N.d.  | N.d.   | N.d.   | N.d.  | N.d.   |
|   | Efluente         | 39±12                | N.d.  | N.d.   | N.d.   | N.d.  | N.d.   |
|   | <b>Desempeño</b> | <b>89±6%</b>         | <b>N.d.</b>                                   | <b>N.d.</b>                                  | <b>N.d.</b>                                  | <b>N.d.</b>                                 | <b>N.d.</b>                                  |
| <b>Módulo II</b><br><b>AR de</b><br><b>baño de</b><br><b>teñido</b> | Influyente       | 495±77               | 149±38  | 147±55                                       | 194±52                                       | 7662±3086                                   | 7204±3376                                    |
|   | Efluente         | 256±80               | 84±24   | 70±32  | 98±29  | 4337±1951                                   | 3681±1354                                    |
|   | <b>Desempeño</b> | <b>49±14%</b>        | <b>42±14%</b>                                 | <b>52±16%</b>                                | <b>51±15%</b>                                | <b>42±18%</b>                               | <b>46±19%</b>                                |
| <b>Módulo III</b><br><b>Mezcla</b><br><b>de AR</b>                  | Influyente       | 480±147              | 57±12   | 50±24  | 64±18  | 3368±1144                                   | 3097±1207                                    |
|   | Efluente         | 263±110              | 49±16   | 44±22  | 54±17  | 2938±1088                                   | 2641±1118                                    |
|   | <b>Desempeño</b> | <b>43±24%</b>        | <b>19±18%</b>                                 | <b>17±22%</b>                                | <b>19±25%</b>                                | <b>13±20%</b>                               | <b>15±26%</b>                                |

Del módulo II, alimentado con la dilución de baño de teñido en agua sanitaria, se observan remociones alrededor del 50% de los contaminantes en estudio. En cambio, al observar el módulo III, alimentado con la mezcla de agua de medio blanqueo con baño de teñido en agua sanitaria, se concluye que esta mezcla afecta de manera considerable el desempeño de los sistemas, ya que las remociones alcanzadas por éstos oscilan alrededor del 15%. A continuación se mencionan las causas que provocan este comportamiento de los sistemas de tratamiento.

El HAFH no tuvo un desempeño favorable en la remoción de contaminantes medidos como DQO y color, dado que su diseño, construcción y operación no fueron adecuados. Van der Zee y Villaverde (2005) mencionan que cuando se presentan muy bajas eficiencias usualmente éstas reflejan condiciones no óptimas de diseño y operación, que impiden la formación de la biopelícula necesaria para la degradación de los colorantes y demás contaminantes presentes. El error de diseño, así como de operación de los HAFH originó que tanto los compuestos orgánicos no coloridos, como los coloridos fueran arrastrados en



el efluente conduciendo a bajas remociones de DQO y color, tal como lo sugiere Mbuligwe (2005).

Bulc y Ojstršek (2008) documentan que los resultados completos del tratamiento de agua residual textil por medio de humedales artificiales bien diseñados y operados indican la reducción de los distintos parámetros de contaminación en el agua residual dependiendo de la composición del agua residual textil, de su constitución química, de las sustancias orgánicas aplicadas, y del diseño del sistema, mientras que el tiempo de residencia tiene un efecto menor.

Por otro lado, Ong et al. (2009) explican que la remoción de color se da por la biodegradación de los enlaces azo en los humedales, pues la contribución de la grava en la remoción a través de la adsorción es despreciable o mínima. Esto apunta hacia la necesidad de repetir estos experimentos en un HAFH operando correctamente y evaluando la remoción de estos colorantes y de contaminantes medidos como DQO.

Ong et al. (2009) y Van der Zee y Villaverde (2005) reportan que la mayor parte de la concentración de colorante fue removida en una región anaerobia, lo que coincide con Dos Santos et al. (2007), quienes dilucidan que el oxígeno es un aceptor de electrones más efectivo que los azo colorantes, justificando las bajas tasas de decoloración (10-30%) bajo condiciones aerobias y concuerda con las remociones de color obtenidas en el HAFH (15-24%) que son atribuidas esencialmente a la posible y limitada actividad anaerobia en la zona donde esto ocurrió.

La buena remoción de DQO alcanzada en el humedal del módulo I ( $77\pm 12\%$ ), es debida principalmente a la filtración, sedimentación y adsorción de los aditivos presentes en el agua de medio-blanqueo y/o compuestos orgánicos (Bulc y Ojstršek, 2008). Por otro lado, así como refiere Mbuligwe (2005), la remoción de DQO en los tres sistemas de tratamiento, sugiere que los compuestos orgánicos en el agua del módulo I ( $89\pm 6\%$  remoción de DQO) son menos recalcitrantes que los del agua que alimentó el módulo II ( $49\pm 14\%$  remoción de DQO).

Al combinar el AR de medio blanqueo con el AR de baño de teñido, la primera altera las características de la segunda y viceversa, formando un nuevo tipo de agua residual con características diferentes con la que se alimentó el módulo III, en el que la remoción promedio de DQO lograda, resulta ser un valor intermedio entre los obtenidos en los dos tipos de agua residual primeros (**Tabla 4.3**). Esto significaría que al mezclar las aguas residuales se llevan a cabo una serie de reacciones entre sus componentes que hacen al AR del módulo I más recalcitrante y al AR del módulo II, más biodegradable.

Para el AR de baño de teñido los sistemas presentaron mejores remociones de color que para la mezcla de aguas residuales, con una variabilidad menor; a pesar de que el primer tipo de agua es más colorido y contiene mayor concentración de colorante que la segunda. Lo anterior se atribuye a que la biotransformación de los colorantes conduce a la descomposición de los cromóforos, modificando las características de absorción de los colorantes, así como lo declaran Bulc y Ojstršek (2008). Por esta razón la absorbancia decrece mientras se mantiene la coloración del agua; es decir, mientras las lecturas de concentración de color en el efluente indicaban valores más bajos que los de entrada, el agua se veía igual o más colorida. De igual forma, Van der Zee y Villaverde (2005) indican que los colorantes tipo azo, son degradados a aminas aromáticas, éstas, en presencia de oxígeno sufren cambios en su estructura molecular, produciendo compuestos estables, solubles y altamente coloreados.

Prestando atención a las bajas remociones de concentración de colorante conseguidas en el módulo III, se considera que no se rompió la estructura de los colorantes en ninguno de los tres sistemas de tratamiento, así como lo señala Mbuligwe (2005). Esto apunta nuevamente a la recalcitrancia alcanzada por la mezcla de las aguas residuales.

El biofiltro bajó el pH del agua de entrada en los tres módulos, lo neutralizó. El ajuste del pH se dio debido a los ácidos producidos por la acción microbiana dentro del biofiltro (Mbuligwe, 2005).

El análisis de las remociones promedio obtenidas de DQO (58%) y de concentración de colorante (62%) en el biofiltro del módulo II, así como lo mencionan Mbuligwe (2005) y Davies et al. (2007), sugiere que más de la mitad de los colorantes presentes en el agua

residual fueron mineralizados, esto, por la semejanza entre los valores de remoción obtenidos en ambos parámetros.

Hernández (2009) notificó que un biofiltro percolador anaerobio seguido por un HAFH, alcanzó remociones de DQO de 93% y 80% de color. A su vez, un biofiltro seguido por un sistema SBR alcanzó 73% de remoción de DQO y 85% de color. Estos sistemas de tratamiento produjeron una favorable reducción de la concentración de color; sin embargo, proporcionaron un alto nivel de toxicidad en su efluente, debido a la formación de productos intermediarios (aminas aromáticas).

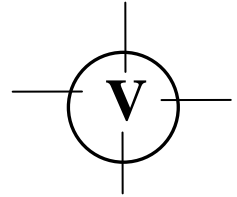
El sistema de biofiltración sobre lecho orgánico, estudiado por Mendoza (2010) presenta buenas remociones de color (85%), contaminantes disueltos medidos como DQO (88%) y nitrógeno (85% N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 65% NT)

La reducción de DQO y color en el biofiltro y la combinación biofiltro-HAFH, es similar a los resultados obtenidos por diferentes autores, por ejemplo Quezada, Linares y Buitrón (2000) obtuvieron eficiencias de degradación entre 76 y 97% de DQO, con 80% de remoción de color, empleando agua residual sintética con colorantes ácidos y básicos en un biofiltro aerobio operado en un sistema SBR; mientras que Ong et al. (2009) reportaron remociones por encima de 78% de DQO y de 96% en promedio para la remoción de color, en un humedal artificial con flujo ascendente, con agua sintética compuesta por sólo un colorante (naranja ácido 7) y algunos nutrientes.

Wu et al. (2006) alcanzaron remociones de color de 92%, y 86% de DQO, con un proceso anóxico combinado con un reactor biológico de oxidación; su TRH fue de 12 h, aplicando agua residual textil real; en tanto que, Tantak y Chaudari (2006), con un proceso de Fenton combinado con un proceso biológico aerobio, lograron remociones de 95% de color y alrededor de 80% para DQO, utilizando un agua sintética con dos colorantes reactivos y uno ácido.

Dos Santos et al. (2007) presentan las ventajas y desventajas de diferentes tipos de tratamiento, recomendando una secuencia de tratamientos, sin dejar de considerar un tratamiento bajo condiciones anaerobias.

Bulc y Ojstršek (2008) y la mayoría de los investigadores mencionados emplearon agua residual sintética conformada por diferentes tipos de colorantes y, en algunos casos, con algunos aditivos utilizados en la industria textil. A diferencia de ellos, en este estudio, el agua residual empleada fue un agua residual real, descargada directamente del equipo de teñido de la empresa cooperante, lo que implicó una considerable variabilidad en los parámetros medidos. Esto manifiesta que es altamente recomendable repetir estos experimentos considerando un sistema de humedales bien diseñado y operado adecuadamente para realmente verificar si el sistema combinado puede degradar las aminas tóxicas formadas en los biofiltros.



---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 5.1 Conclusiones

De acuerdo con el objetivo de esta investigación, que fue evaluar el sistema combinado de biofiltración anaerobia – HAFH a nivel de laboratorio para el tratamiento de efluentes de la industria textil que contiene colorantes tipo azo; se registraron la remoción de contaminantes medidos como DQO y la remoción de concentración de colorante en los efluentes obtenidos durante el experimento, considerando la limitante de que el estudio se realizó empleando agua residual textil real, que implica variación en los valores del influente de los sistemas.

Es importante considerar que el desempeño de los HAFH se vio afectado por el error de diseño y construcción que no permitió la formación de poblaciones de microorganismos y su interacción con las hidrófitas para la degradación eficiente de los contaminantes, de tal modo que las remociones que el HAFH presenta, en cada módulo, son bajas y poco representativas de la operación de este sistema.

La evaluación de los colorantes y compuestos químicos de los dos tipos de efluentes textiles en los sistemas, y la evaluación de los sistemas (individual y combinado) con base en la eliminación de DQO y color, condujeron a las siguientes conclusiones:

### **5.1.1 Módulo I (agua de medio blanqueo):**

- Para el agua de blanqueo cuya composición es esencialmente de compuestos orgánicos, el sistema que tuvo mejor desempeño fue el sistema acoplado (Biofiltro-humedal) con remociones promedio de materia orgánica medida como DQO de  $97\pm 2\%$ . En segundo lugar estuvo el biofiltro con remociones de DQO de  $94\pm 4\%$ . En tercer lugar, el humedal con  $77\pm 12\%$  de remoción de DQO. El color no se midió en este módulo, puesto que este tipo de agua no contenía colorante.
- Para la DQO se confirma que debido al problema inicial de diseño existe diferencia significativa ( $P < 0.01$ ) entre el sistema constituido por el humedal individual y los otros dos sistemas (biofiltro y biofiltro-HAFH) y que el desempeño de estos dos últimos entre sí son estadísticamente iguales (no hay diferencias significativas).

### **5.1.2 Módulo II (agua del baño de teñido):**

- Para la DQO, concentración de colorante y color, se confirma que existe diferencia significativa entre el sistema constituido por el humedal individual y los otros dos sistemas (biofiltro y biofiltro.humedal), y que el desempeño de ambos entre sí, son estadísticamente iguales (no hay diferencias significativas) ( $P < 0.01$ ).
- Al analizar la DQO, la concentración de colorante y el color, se puede ver que el mejor desempeño se logra en el sistema combinado con una remoción promedio de  $62\pm 14\%$  de DQO,  $64\pm 16\%$  de concentración de color y  $64\pm 19\%$  de color verdadero.

### **5.1.3 Módulo III (mezcla del agua de blanqueo y colorante):**

- Se observó inestabilidad en el funcionamiento de los sistemas (humedal, biofiltro y combinado).

- Para DQO, concentración de colorante y color, se confirma que no existe diferencia significativa entre los tres sistemas de tratamiento ( $P < 0.01$ ), es decir su desempeño fue semejante, presentando bajas eficiencias, comparadas con las de los otros dos tipos de agua. Esto permite inferir que se presenta inhibición de los sistemas causada por algunos de los compuestos que se forman cuando se hace la mezcla.
- Los resultados obtenidos en cuanto a remoción en este módulo son:  $43 \pm 24\%$  de DQO,  $18 \pm 65\%$  de concentración de color y  $13 \pm 20\%$  de color verdadero.
- De lo anterior se concluye que para obtener mejores resultados con estos sistemas, es necesario separar los efluentes de medio blanqueo y teñido para su tratamiento eficiente, lo que implicaría un rediseño del sistema de drenaje en la industria textil en estudio.

Del tercer objetivo específico planteado para este trabajo, que fue el de determinar qué sistema es más eficiente en la remoción de color y contaminantes medidos como DQO, se encontró que el biofiltro individual es adecuado.

## 5.2 Recomendaciones

Con base en el estudio realizado, se recomienda lo siguiente:

- Estudiar de manera específica el porcentaje residual de los aditivos en un efluente textil, para que así como en la literatura se encuentra el grado de fijación de colorante en las fibras, se cuente con la información sobre el grado de fijación (si lo hay) de los aditivos en el proceso de teñido, o bien, se conozca el resultado del proceso con respecto a lo que sucede con los aditivos.
- Realizar el experimento empleando para el tratamiento, procesos biológicos alimentados con agua residual textil conteniendo más de un tipo de colorante y verificar la resistencia de los microorganismos ante tal carga de contaminante.

- Investigar las reacciones químicas que se originan en el proceso tanto de preparación (medio blanqueo), como en el mismo teñido, de tal manera que se determine, si existe la posibilidad, qué sustancias (aditivos) pueden recuperarse del agua residual o bien, qué sustancias se encuentran presentes en el efluente final.
- Con base en lo anterior, estudiar la interacción de los colorantes en el proceso, y analizar la posible recuperación de éstos para reutilizarlos en el proceso de teñido.
- Buscando proponer un método efectivo y económico para el tratamiento de aguas residuales textiles, se propone llevar a cabo el experimento utilizando humedales artificiales bien diseñados, contruidos y operados para evaluar su desempeño.



## ANEXO A

---

### TABLAS DE RESULTADOS

---

#### A.1

Se presentan en la Tabla A.1 los resultados del barrido espectrofotométrico realizados a la solución madre (solución preparada con las concentraciones originales de los colorantes que se usan en el teñido de color Black Jack 1491), así como a diluciones de ésta al 0.5, 1, 2, 5, 20 y 50%.

La Tabla A.2 muestra los resultados del barrido espectrofotométrico que se realizó con el agua residual del baño de teñido. Los datos se utilizaron para elaborar las curvas patrón en la medición de la concentración de colorante a las muestras en estudio. El agua residual de blanqueo no contiene colorante, no fue necesario realizar barrido para este tipo de agua.

**Tabla A.1** Respuesta de máxima absorbancia de la solución madre de colorantes a diferentes concentraciones

| Concentración de colorante (mg/L) | Abs $\lambda=601\text{nm}$ |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 0                                 | 0                          |
| 49.59                             | 0.03                       |
| 99.18                             | 0.06                       |
| 198.35                            | 0.13                       |
| 495.88                            | 0.34                       |
| 991.76                            | 0.71                       |
| 1983.52                           | 1.30                       |
| 2975.28                           | 2.17                       |
| 3967.04                           | 3.08                       |
| 4958.8                            | ND                         |
| 5950.56                           | ND                         |
| 6942.32                           | ND                         |
| 7934.08                           | ND                         |
| 8925.84                           | ND                         |
| 9917.60                           | ND                         |

**Tabla A.2.** Respuesta de máxima absorbancia del baño de teñido a diferentes concentraciones

| Concentración de colorante (mg/L) | Abs $\lambda=601\text{nm}$ |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 0                                 | 0                          |
| 17.36                             | 0.12                       |
| 34.71                             | 0.23                       |
| 69.42                             | 0.48                       |
| 173.56                            | 1.07                       |
| 347.17                            | 1.37                       |
| 1735.58                           | 1.67                       |
| 3471.16                           | 2.87                       |

## A.2

A continuación se presentan los datos experimentales agrupados de acuerdo con el parámetro medido.

En primer lugar se tienen los parámetros de campo (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, SDT, y temperatura). Enseguida se encuentran los datos obtenidos en la medición de DQO; concentración de colorante para los tres colorantes que conforman la mezcla del Black Jack 1491 (Negro Ciba R, Negro Ciba G y Amarillo Ciba S3R); color aparente y color verdadero. Los datos se sometieron a una serie de pruebas de significancia para asegurar su confiabilidad (Ver Anexo B). los espacios que se encuentran vacíos en las tablas se deben al hecho de que los valores de estas celdas fueron descartados con base en las pruebas de discordancia.

---

**Parámetro medido: pH**

| Día | Fecha     | Módulo I                |                      |                        |                         | Módulo II        |               |                 |                | Módulo III        |            |                  |                 |
|-----|-----------|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|------------|------------------|-----------------|
|     |           | Influyente Semiblanqueo | Humedal semiblanqueo | Biofiltro semiblanqueo | Biof - hum semiblanqueo | Influyente color | Humedal color | Biofiltro color | Biof-hum color | Influyente Mezcla | Hum mezcla | Biofiltro mezcla | Hum-Biof mezcla |
| 62  | 03-ago-09 | 8.61                    | 8.32                 | 6.90                   | 8.55                    | 9.85             |               | 7.07            | 8.60           | 9.44              | 8.25       | 6.91             | 8.69            |
| 63  | 04-ago-09 | 8.27                    | 7.86                 | 7.29                   |                         |                  | 9.14          | 7.32            | 8.57           | 9.27              | 8.66       | 7.06             | 8.72            |
| 64  | 05-ago-09 | 7.93                    | 8.01                 | 7.20                   |                         | 9.58             | 9.11          | 7.28            | 8.52           | 9.34              | 8.83       | 7.07             | 8.35            |
| 65  | 06-ago-09 | 7.81                    | 8.19                 | 7.00                   | 8.43                    | 9.51             | 8.60          | 7.22            | 8.63           | 9.25              |            | 7.01             | 8.57            |
| 66  | 07-ago-09 | 7.69                    | 8.01                 | 6.85                   | 8.66                    | 9.73             | 8.90          |                 |                | 9.25              | 8.64       | 6.95             | 8.77            |
| 76  | 17-ago-09 | 7.29                    | 7.64                 | 6.95                   | 8.77                    | 9.46             | 8.80          | 7.62            | 8.90           | 8.80              | 8.27       | 7.28             | 8.96            |
| 77  | 18-ago-09 | 7.70                    | 8.36                 | 7.04                   | 9.00                    | 9.51             | 9.06          | 6.99            | 8.89           | 9.08              | 8.53       | 7.10             | 8.94            |
| 78  | 19-ago-09 | 7.63                    | 8.58                 | 7.00                   | 8.68                    | 9.33             | 8.98          | 7.03            | 8.51           | 9.40              | 8.29       | 7.16             | 8.75            |
| 79  | 20-ago-09 | 7.65                    | 8.04                 | 6.71                   | 8.80                    | 9.68             | 8.52          | 6.98            | 8.78           | 9.30              | 9.03       | 6.92             | 8.74            |
| 80  | 21-ago-09 | 7.34                    | 8.10                 | 6.82                   | 8.88                    | 9.55             | 9.24          | 7.09            | 8.83           | 8.84              | 8.92       | 7.06             | 8.87            |
| 83  | 24-ago-09 | 7.81                    | 8.13                 | 6.82                   | 8.71                    | 9.60             | 9.06          | 6.99            | 8.83           | 9.33              | 8.38       | 7.15             | 8.88            |
| 84  | 25-ago-09 | 7.56                    | 8.24                 | 6.93                   | 8.84                    | 9.47             | 8.70          | 7.00            | 9.00           | 8.75              | 8.50       | 6.98             | 9.03            |
| 85  | 26-ago-09 | 7.15                    | 8.02                 |                        | 9.05                    | 9.37             | 8.59          | 7.79            | 8.95           |                   | 8.55       |                  | 8.67            |
| 91  | 01-sep-09 | 7.85                    | 8.11                 | 7.36                   | 8.87                    | 9.59             | 8.51          | 6.96            | 8.62           | 9.20              | 8.47       | 6.90             | 8.84            |
| 92  | 02-sep-09 | 7.36                    | 8.27                 | 7.30                   | 8.77                    | 9.48             | 8.91          | 6.84            | 8.64           | 8.82              | 8.46       | 6.92             | 8.97            |
| 93  | 03-sep-09 | 7.36                    | 8.20                 | 7.18                   | 8.69                    | 9.38             | 8.74          | 6.94            | 8.54           | 8.75              | 8.39       | 6.84             | 8.68            |
| 94  | 04-sep-09 | 7.92                    | 8.41                 | 6.86                   | 8.74                    | 9.72             | 8.75          | 6.78            | 8.80           | 9.11              | 8.51       | 6.87             | 8.68            |
| 97  | 07-sep-09 | 7.19                    | 8.22                 | 6.88                   | 8.89                    | 9.67             | 9.20          | 6.83            | 8.98           | 8.94              | 8.50       | 6.83             | 8.95            |
| 100 | 10-sep-09 | 7.24                    | 8.14                 | 6.78                   | 8.62                    | 8.85             | 8.32          | 6.71            | 8.61           | 8.17              | 8.14       | 6.68             | 8.51            |
| 101 | 11-sep-09 | 7.39                    | 8.31                 | 6.71                   | 8.69                    | 9.60             | 8.78          | 6.83            | 8.82           | 8.78              | 8.48       | 6.84             | 8.84            |
| 104 | 14-sep-09 | 7.16                    | 7.77                 | 6.96                   | 8.84                    | 9.15             | 8.65          | 7.26            | 8.89           | 8.32              | 8.43       | 7.16             | 8.91            |
| 107 | 17-sep-09 | 7.69                    | 8.33                 | 6.82                   | 8.80                    | 8.94             | 8.56          | 7.02            | 8.70           | 8.13              | 8.48       | 6.98             | 8.83            |
| 108 | 18-sep-09 | 7.40                    | 8.03                 | 6.61                   | 8.73                    | 9.26             | 8.52          | 6.93            | 8.58           | 8.38              | 8.38       | 6.89             | 8.88            |
| 111 | 21-sep-09 | 7.37                    | 8.34                 | 7.18                   | 8.80                    | 9.57             | 8.79          | 7.22            | 8.80           | 8.93              | 8.69       | 6.98             | 8.80            |
| 112 | 22-sep-09 | 7.50                    | 8.53                 | 6.79                   | 8.81                    | 9.52             | 8.77          | 6.79            | 8.95           | 9.07              | 8.75       | 7.03             | 8.95            |
| 113 | 23-sep-09 | 7.62                    | 8.97                 | 6.72                   | 8.91                    | 9.43             | 8.78          | 7.20            | 9.01           | 8.86              | 8.80       | 7.09             | 8.99            |
| 114 | 24-sep-09 | 7.71                    | 8.45                 | 6.71                   | 8.75                    | 9.39             | 8.67          | 6.85            | 8.97           | 8.81              | 8.59       | 7.10             | 8.89            |
| 115 | 25-sep-09 | 7.72                    | 8.26                 | 7.10                   | 8.83                    | 8.90             | 8.73          | 7.34            | 9.11           |                   | 8.58       | 7.11             | 8.90            |
| 118 | 28-sep-09 | 7.43                    | 8.27                 | 7.35                   | 8.90                    | 9.83             | 8.72          | 6.97            | 8.93           | 8.12              | 8.51       | 7.28             | 9.05            |
| 119 | 29-sep-09 | 7.00                    | 8.33                 | 6.88                   | 9.05                    | 9.76             | 8.90          | 6.99            | 9.02           | 9.04              | 8.39       | 7.19             | 8.99            |
| 120 | 30-sep-09 | 7.54                    | 8.40                 | 6.80                   | 8.89                    | 9.62             | 8.59          | 7.12            | 8.97           | 8.90              | 8.66       | 6.95             | 9.03            |
| 121 | 01-oct-09 | 7.02                    | 8.47                 | 6.71                   | 8.90                    | 9.67             | 8.69          | 6.84            | 9.09           | 9.14              | 8.85       | 7.22             | 8.87            |
| 122 | 02-oct-09 | 7.39                    | 8.10                 | 6.52                   | 8.84                    | 9.50             | 8.62          | 7.07            | 8.98           | 8.97              | 8.74       | 7.22             | 8.99            |
| 125 | 05-oct-09 | 7.03                    | 8.14                 | 6.77                   | 9.08                    | 9.10             | 8.60          | 7.09            | 8.88           | 8.15              | 8.61       | 7.36             | 9.08            |
| 126 | 06-oct-09 | 7.48                    | 8.41                 | 6.82                   | 8.92                    | 8.76             | 8.87          | 7.49            | 8.78           | 9.47              | 8.41       |                  | 8.98            |
| 127 | 07-oct-09 | 7.43                    | 8.37                 | 6.79                   | 8.92                    | 8.37             |               |                 |                | 8.71              | 8.59       | 7.48             | 9.09            |
| 128 | 08-oct-09 | 7.62                    | 8.67                 |                        | 8.72                    | 8.55             | 9.09          | 7.49            | 8.99           | 8.95              | 8.75       |                  | 8.75            |
| 133 | 13-oct-09 | 7.77                    | 8.36                 | 6.88                   |                         | 8.20             | 8.46          | 6.76            | 8.63           | 8.10              | 8.29       | 6.95             | 8.29            |

**Parámetro medido: pH**

|                     |              | <b>Módulo I</b>                |                             |                               |                                | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|---------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b>          | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 135                 | 15-oct-09    | 7.85                           | 8.42                        | 7.26                          | 8.64                           | 9.25                    | 8.83                 | 7.59                   | 8.65                  | 8.79                     | 8.29              |                         | 8.63                   |
| 136                 | 16-oct-09    | 7.39                           | 8.50                        | 7.34                          | 8.64                           |                         | 8.98                 |                        | 8.79                  |                          | 8.35              |                         | 8.63                   |
| 139                 | 19-oct-09    | 6.91                           | 8.20                        | 6.46                          | 8.61                           |                         | 8.29                 | 6.87                   | 8.64                  |                          |                   | 6.67                    | 8.66                   |
| 140                 | 20-oct-09    | 7.72                           | 8.15                        |                               | 8.47                           | 8.25                    | 8.83                 | 7.63                   | 8.63                  | 8.66                     | 8.14              | 6.64                    | 8.35                   |
| 141                 | 21-oct-09    | 7.99                           | 8.67                        | 7.49                          | 8.92                           |                         | 8.77                 |                        | 9.00                  | 8.33                     |                   |                         | 8.98                   |
| 143                 | 23-oct-09    | 7.51                           | 8.25                        |                               | 8.56                           | 8.78                    |                      | 7.08                   |                       | 8.34                     | 8.22              | 6.84                    | 8.31                   |
| 148                 | 28-oct-09    | 7.45                           | 8.43                        | 7.40                          | 8.87                           | 8.39                    | 8.42                 | 7.29                   | 8.74                  | 8.63                     | 8.17              | 6.89                    | 8.55                   |
| 155                 | 04-nov-09    | 7.89                           | 8.23                        | 7.23                          |                                |                         | 8.67                 | 7.01                   | 8.52                  | 8.72                     | 8.46              | 7.06                    | 8.89                   |
| 162                 | 11-nov-09    | 7.76                           | 8.67                        | 6.98                          | 8.81                           | 8.53                    | 8.49                 | 6.78                   | 8.66                  | 8.36                     | 8.19              | 7.31                    | 8.40                   |
| 169                 | 18-nov-09    | 7.99                           | 8.10                        | 6.68                          | 8.46                           | 9.16                    |                      | 6.53                   |                       | 8.85                     |                   | 6.68                    | 8.45                   |
| 174                 | 23-nov-09    | 8.20                           | 8.21                        | 6.49                          | 8.41                           | 9.07                    |                      | 6.62                   |                       | 8.67                     |                   | 6.48                    | 8.72                   |
| Media               |              | 7.58                           | 8.27                        | 6.94                          | 8.77                           | 9.27                    | 8.75                 | 7.07                   | 8.79                  | 8.83                     | 8.50              | 7.00                    | 8.78                   |
| Desviación estándar |              | 0.34                           | 0.24                        | 0.26                          | 0.16                           | 0.45                    | 0.23                 | 0.28                   | 0.18                  | 0.39                     | 0.22              | 0.21                    | 0.21                   |

**Parámetro medido: Temperatura (°C)**

|            |              | <b>Módulo I</b>                |                             |                               |                                | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b> | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 62         | 03-ago-09    | 27.40                          | 28.60                       | 29.20                         | 29.00                          | 28.20                   | 28.70                | 29.10                  | 29.20                 | 28.30                    | 28.80             | 29.20                   | 28.70                  |
| 63         | 04-ago-09    | 27.20                          | 28.50                       | 28.30                         | 28.60                          | 28.10                   | 28.90                | 28.40                  | 29.00                 | 28.20                    | 28.80             | 27.70                   | 28.10                  |
| 64         | 05-ago-09    | 25.90                          | 24.80                       | 24.90                         | 24.80                          | 25.40                   | 24.70                | 25.50                  | 25.20                 | 25.70                    | 24.90             | 24.90                   | 24.90                  |
| 65         | 06-ago-09    | 27.50                          | 27.00                       | 26.70                         | 26.60                          | 27.60                   | 25.70                | 26.90                  | 26.50                 | 26.80                    | 27.00             | 26.60                   | 26.20                  |
| 66         | 07-ago-09    | 26.80                          | 27.30                       | 26.90                         | 26.60                          | 27.00                   | 26.80                | 26.60                  | 27.00                 | 27.30                    | 26.80             | 26.90                   | 26.80                  |
| 76         | 17-ago-09    | 25.80                          | 25.00                       | 25.20                         | 25.20                          | 26.10                   | 25.70                | 25.40                  | 25.00                 | 25.90                    | 25.40             | 25.20                   | 25.00                  |
| 77         | 18-ago-09    | 25.00                          | 24.60                       | 24.60                         | 24.40                          | 24.90                   | 24.60                | 24.50                  | 24.30                 | 24.90                    | 24.40             | 24.50                   | 24.40                  |
| 78         | 19-ago-09    | 26.89                          | 26.80                       | 26.80                         | 26.70                          | 26.70                   | 26.60                | 26.80                  | 26.50                 | 26.70                    | 26.70             | 26.80                   | 26.60                  |
| 79         | 20-ago-09    | 25.50                          | 24.40                       | 25.10                         | 24.90                          | 25.50                   | 24.80                | 24.70                  | 25.10                 | 25.50                    | 24.60             | 24.90                   | 24.90                  |
| 80         | 21-ago-09    | 27.00                          | 26.70                       | 26.80                         | 26.80                          | 27.20                   | 26.80                | 27.10                  | 26.90                 | 26.80                    | 26.80             | 26.80                   | 26.80                  |
| 83         | 24-ago-09    | 27.60                          | 26.30                       | 27.30                         | 26.00                          | 28.70                   | 26.50                | 27.60                  | 27.20                 | 27.50                    | 26.80             | 27.70                   | 27.70                  |

**Parámetro medido: Temperatura (°C)**

|            |              | <i>Módulo I</i>                |                             |                               |                                | <i>Módulo II</i>        |                      |                        |                       | <i>Módulo III</i>        |                   |                         |                        |
|------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b> | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 84         | 25-ago-09    | 26.40                          | 25.20                       | 25.80                         | 25.10                          | 26.50                   | 25.50                | 25.60                  | 25.10                 | 25.30                    | 25.30             | 25.60                   | 24.60                  |
| 85         | 26-ago-09    | 27.00                          | 26.90                       | 26.50                         | 27.10                          | 26.80                   | 26.70                | 26.90                  | 26.60                 | 26.50                    | 26.40             | 26.60                   | 26.80                  |
| 91         | 01-sep-09    | 27.30                          | 26.10                       | 27.00                         | 25.30                          | 27.10                   | 27.20                | 27.40                  | 27.40                 | 26.90                    | 27.10             | 27.50                   | 26.90                  |
| 92         | 02-sep-09    | 28.30                          | 26.70                       | 26.00                         | 26.70                          | 26.80                   | 26.90                | 27.40                  | 27.30                 | 28.00                    | 26.70             | 27.30                   | 26.80                  |
| 93         | 03-sep-09    | 27.80                          | 27.90                       | 27.90                         | 27.70                          | 27.70                   | 27.80                | 27.40                  | 27.10                 | 27.80                    | 27.60             | 26.90                   | 26.60                  |
| 94         | 04-sep-09    | 25.60                          | 25.30                       | 25.10                         | 24.50                          | 25.60                   | 25.20                | 27.70                  | 25.20                 | 25.50                    | 25.00             | 25.00                   | 24.90                  |
| 97         | 07-sep-09    | 23.80                          | 23.80                       | 24.50                         | 24.30                          | 24.20                   | 24.90                | 24.20                  | 24.70                 | 24.40                    | 24.80             | 24.90                   | 24.90                  |
| 100        | 10-sep-09    | 25.20                          | 24.70                       | 25.50                         | 24.90                          | 25.40                   | 24.50                | 25.70                  | 24.50                 | 25.20                    | 24.70             | 25.40                   | 24.60                  |
| 101        | 11-sep-09    | 24.40                          | 24.00                       | 24.70                         | 24.50                          | 24.70                   | 24.30                | 24.60                  | 24.30                 | 24.70                    | 24.40             | 24.60                   | 24.30                  |
| 104        | 14-sep-09    | 26.00                          | 26.10                       | 26.20                         | 26.10                          | 26.00                   | 26.20                | 26.10                  | 26.20                 | 26.30                    | 26.10             | 26.10                   | 25.80                  |
| 107        | 17-sep-09    | 24.90                          | 24.60                       | 24.80                         | 24.90                          | 25.10                   | 24.80                | 25.10                  | 24.90                 | 24.90                    | 24.90             | 24.90                   | 25.20                  |
| 108        | 18-sep-09    | 26.00                          | 26.00                       | 25.90                         | 25.80                          | 26.10                   | 26.00                | 25.90                  | 25.80                 | 26.10                    | 25.80             | 25.90                   | 26.10                  |
| 111        | 21-sep-09    | 24.90                          | 25.50                       | 25.60                         | 25.50                          | 26.40                   | 26.40                | 26.50                  | 26.60                 | 26.30                    | 26.70             | 26.80                   | 26.80                  |
| 112        | 22-sep-09    | 26.60                          | 26.20                       | 26.30                         | 26.40                          | 26.40                   | 25.90                | 26.90                  | 26.30                 | 26.40                    | 26.10             | 26.50                   | 26.50                  |
| 113        | 23-sep-09    | 25.30                          | 25.20                       | 25.10                         | 25.20                          | 25.50                   | 25.30                | 25.30                  | 25.30                 | 25.60                    | 25.20             | 25.30                   | 25.30                  |
| 114        | 24-sep-09    | 25.20                          | 25.30                       | 25.30                         | 25.40                          | 25.30                   | 25.40                | 25.50                  | 25.60                 | 25.10                    | 25.70             | 25.70                   | 25.80                  |
| 115        | 25-sep-09    | 26.10                          | 26.00                       | 26.20                         | 26.10                          | 25.80                   | 26.00                | 26.10                  | 26.10                 | 25.90                    | 25.80             | 25.80                   | 25.90                  |
| 118        | 28-sep-09    | 25.90                          | 26.30                       | 26.90                         | 26.50                          | 26.80                   | 26.60                | 26.80                  | 26.40                 | 26.30                    | 26.20             | 26.70                   | 26.40                  |
| 119        | 29-sep-09    | 23.80                          | 23.40                       | 23.40                         | 23.10                          | 23.60                   | 23.40                | 23.50                  | 23.50                 | 23.60                    | 23.50             | 23.40                   | 23.40                  |
| 120        | 30-sep-09    | 22.90                          | 22.80                       | 23.50                         | 22.80                          | 22.80                   | 22.80                | 22.50                  | 22.90                 | 22.90                    | 22.30             | 22.40                   | 22.40                  |
| 121        | 01-oct-09    | 23.40                          | 23.30                       | 23.40                         | 23.80                          | 23.40                   | 23.30                | 23.10                  | 23.10                 | 23.40                    | 23.30             | 23.50                   | 23.50                  |
| 122        | 02-oct-09    | 25.10                          | 24.00                       | 24.40                         | 24.60                          | 25.00                   | 24.90                | 24.90                  | 24.50                 | 24.60                    | 26.20             | 24.50                   | 24.50                  |
| 125        | 05-oct-09    | 24.90                          | 24.90                       | 24.90                         | 24.90                          | 25.30                   | 24.40                | 24.60                  | 25.20                 | 25.50                    | 25.10             | 25.40                   | 25.20                  |
| 126        | 06-oct-09    | 25.20                          | 25.10                       | 24.80                         | 25.00                          | 25.50                   | 24.80                | 24.90                  | 25.40                 | 25.60                    | 24.90             | 25.00                   | 25.10                  |
| 127        | 07-oct-09    | 23.90                          | 24.80                       | 24.80                         | 24.80                          | 24.40                   | 24.30                | 24.50                  | 24.30                 | 24.00                    | 25.00             | 25.30                   | 25.00                  |
| 128        | 08-oct-09    | 26.40                          | 25.90                       | 27.20                         | 26.80                          | 23.80                   | 25.60                | 27.30                  | 26.50                 | 26.80                    | 26.30             | 26.80                   | 26.80                  |

**Parámetro medido: Temperatura (°C)**

|                     |           | <i>Módulo I</i>         |                      |                        |                         | <i>Módulo II</i> |               |                 |                | <i>Módulo III</i> |            |                  |                 |
|---------------------|-----------|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|------------|------------------|-----------------|
| Día                 | Fecha     | Influyente Semiblanqueo | Humedal semiblanqueo | Biofiltro semiblanqueo | Biof - hum semiblanqueo | Influyente color | Humedal color | Biofiltro color | Biof-hum color | Influyente Mezcla | Hum mezcla | Biofiltro mezcla | Hum-Biof mezcla |
| 133                 | 13-oct-09 | 26.20                   | 26.20                | 26.50                  | 26.60                   | 26.30            | 26.80         | 26.60           | 26.30          | 26.40             | 26.20      | 26.10            | 26.30           |
| 135                 | 15-oct-09 | 26.90                   | 26.60                | 26.70                  | 27.00                   | 26.90            | 26.80         | 26.70           | 26.50          | 26.70             | 26.40      | 26.60            | 26.70           |
| 136                 | 16-oct-09 | 26.20                   | 27.20                | 27.40                  | 27.40                   | 27.50            | 27.40         | 26.90           | 27.30          | 27.00             | 27.20      | 27.90            | 27.30           |
| 139                 | 19-oct-09 | 25.00                   | 24.60                | 25.50                  | 24.90                   | 25.00            | 24.80         | 25.80           | 24.50          | 25.10             | 24.70      | 25.30            | 25.00           |
| 140                 | 20-oct-09 | 26.00                   | 25.20                | 25.90                  | 25.90                   | 25.70            | 25.50         | 26.00           | 25.40          | 26.00             | 25.20      | 26.10            | 25.20           |
| 141                 | 21-oct-09 | 25.50                   | 25.70                | 26.10                  | 25.80                   | 25.50            | 25.60         | 25.70           | 25.90          | 25.80             | 25.70      | 25.60            | 25.60           |
| 143                 | 23-oct-09 | 25.20                   | 25.20                | 25.20                  | 25.30                   | 25.30            | 25.30         | 25.10           | 25.30          | 25.30             | 25.10      | 25.10            | 25.20           |
| 148                 | 28-oct-09 | 25.00                   | 25.20                | 25.20                  | 25.10                   | 25.00            | 24.80         | 25.20           | 24.90          | 24.80             | 25.10      | 25.00            | 24.90           |
| 155                 | 04-nov-09 | 24.80                   | 24.90                | 24.80                  | 24.70                   | 24.90            | 24.80         | 24.80           | 25.00          | 24.90             | 24.80      | 24.70            | 24.90           |
| 162                 | 11-nov-09 | 24.50                   | 24.40                | 24.00                  | 24.30                   | 24.60            | 24.50         | 24.40           | 24.50          | 24.30             | 24.40      | 24.10            | 24.20           |
| 169                 | 18-nov-09 | 24.00                   | 23.90                | 24.20                  | 24.30                   | 23.80            | 24.10         | 24.40           | 24.30          | 23.80             | 24.10      | 24.50            | 24.30           |
| 174                 | 23-nov-09 | 24.40                   | 23.60                | 24.80                  | 24.70                   | 24.40            | 24.00         | 25.00           | 24.40          | 24.10             | 23.80      | 24.80            | 24.30           |
| Media               |           | 25.69                   | 25.48                | 25.71                  | 25.58                   | 25.76            | 25.58         | 25.83           | 25.65          | 25.74             | 25.61      | 25.73            | 25.59           |
| Desviación estándar |           | 1.23                    | 1.31                 | 1.26                   | 1.27                    | 1.32             | 1.30          | 1.36            | 1.32           | 1.27              | 1.29       | 1.29             | 1.25            |

**Parámetro medido: Conductividad eléctrica  $\mu\text{S}/\text{cm}$**

|     |           | <i>Módulo I</i>         |                      |                        |                         | <i>Módulo II</i> |               |                 |                | <i>Módulo III</i> |            |                  |                 |
|-----|-----------|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|------------|------------------|-----------------|
| Día | Fecha     | Influyente Semiblanqueo | Humedal semiblanqueo | Biofiltro semiblanqueo | Biof - hum semiblanqueo | Influyente color | Humedal color | Biofiltro color | Biof-hum color | Influyente Mezcla | Hum mezcla | Biofiltro mezcla | Hum-Biof mezcla |
| 62  | 03-ago-09 | 1128.00                 | 1196.00              | 1162.00                | 1071.00                 | 14790.00         | 13400.00      | 13030.00        |                | 8090.00           | 6920.00    | 8140.00          | 7970.00         |
| 63  | 04-ago-09 | 1138.00                 | 1157.00              | 1316.00                | 1285.00                 | 14440.00         | 12400.00      | 14520.00        | 12922.00       | 8720.00           | 7620.00    | 8830.00          | 8780.00         |
| 64  | 05-ago-09 | 1120.00                 | 731.00               | 1037.00                | 953.00                  | 14490.00         | 13470.00      | 14580.00        | 14480.00       | 8340.00           | 7760.00    | 8530.00          | 8410.00         |
| 65  | 06-ago-09 |                         | 909.00               | 1034.00                | 945.00                  | 14680.00         | 14430.00      | 14600.00        | 14740.00       | 8370.00           | 7840.00    | 8410.00          | 8410.00         |
| 66  | 07-ago-09 |                         |                      |                        | 1259.00                 | 14700.00         | 11670.00      | 15000.00        | 12690.00       |                   | 8480.00    | 9270.00          | 9240.00         |
| 76  | 17-ago-09 | 1049.00                 | 1210.00              | 1012.00                |                         | 14790.00         | 12700.00      | 13330.00        |                |                   | 9250.00    | 9890.00          | 13140.00        |
| 77  | 18-ago-09 |                         | 939.00               | 1021.00                | 1049.00                 | 14760.00         | 14980.00      | 14780.00        |                | 8440.00           | 8390.00    | 8510.00          | 8700.00         |

**Parámetro medido: Conductividad eléctrica  $\mu\text{S}/\text{cm}$**

|     |           | <i>Módulo I</i>         |                      |                        |                         | <i>Módulo II</i> |               |                 |                | <i>Módulo III</i> |            |                  |                 |
|-----|-----------|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|------------|------------------|-----------------|
| Día | Fecha     | Influyente Semiblanqueo | Humedal semiblanqueo | Biofiltro semiblanqueo | Biof - hum semiblanqueo | Influyente color | Humedal color | Biofiltro color | Biof-hum color | Influyente Mezcla | Hum mezcla | Biofiltro mezcla | Hum-Biof mezcla |
| 78  | 19-ago-09 | 1083.00                 | 945.00               | 1319.00                | 1336.00                 | 14740.00         | 12740.00      | 12920.00        | 12790.00       | 8650.00           | 8410.00    | 9240.00          | 9320.00         |
| 79  | 20-ago-09 | 832.00                  | 815.00               | 816.00                 | 805.00                  | 11470.00         | 6970.00       | 11470.00        | 11520.00       | 6380.00           | 6300.00    |                  | 6450.00         |
| 80  | 21-ago-09 | 1069.00                 | 850.00               | 995.00                 | 987.00                  | 14880.00         | 14170.00      | 14980.00        |                | 8380.00           | 8200.00    | 8320.00          | 8330.00         |
| 83  | 24-ago-09 | 960.00                  | 867.00               | 1000.00                | 952.00                  | 12430.00         | 13550.00      | 13220.00        | 13480.00       | 6800.00           | 6560.00    | 7390.00          | 6950.00         |
| 84  | 25-ago-09 | 972.00                  | 933.00               | 944.00                 | 906.00                  | 12520.00         | 13160.00      | 12860.00        | 13410.00       | 7070.00           | 7080.00    | 6980.00          | 7240.00         |
| 85  | 26-ago-09 | 1029.00                 | 898.00               | 893.00                 |                         | 11030.00         | 6590.00       | 12230.00        | 12400.00       | 6490.00           | 6010.00    |                  | 6640.00         |
| 91  | 01-sep-09 | 988.00                  | 908.00               | 1002.00                | 915.00                  | 11650.00         | 11880.00      | 6540.00         | 6530.00        | 6550.00           | 6120.00    | 11680.00         | 11900.00        |
| 92  | 02-sep-09 | 1014.00                 | 917.00               | 971.00                 | 919.00                  | 11510.00         | 11630.00      | 6580.00         | 6660.00        | 6590.00           | 6710.00    | 11670.00         | 13710.00        |
| 93  | 03-sep-09 | 1031.00                 | 873.00               | 979.00                 | 788.00                  | 11720.00         | 11640.00      | 6560.00         | 6620.00        | 6590.00           | 6640.00    | 11760.00         | 11790.00        |
| 94  | 04-sep-09 | 1001.00                 | 875.00               | 1025.00                | 646.00                  | 11700.00         | 10950.00      | 6770.00         | 4170.00        | 6530.00           | 6550.00    | 11820.00         | 7360.00         |
| 97  | 07-sep-09 | 952.00                  | 879.00               | 1013.00                | 953.00                  | 11820.00         | 12170.00      | 6680.00         | 6620.00        | 6410.00           | 6540.00    | 13250.00         | 12780.00        |
| 100 | 10-sep-09 | 924.00                  | 832.00               | 912.00                 | 848.00                  | 11610.00         | 11730.00      | 6270.00         | 6250.00        | 6350.00           | 6280.00    | 11680.00         | 11800.00        |
| 101 | 11-sep-09 | 700.00                  |                      |                        | 673.00                  |                  | 9010.00       | 5040.00         | 4970.00        |                   | 5040.00    | 9010.00          | 4930.00         |
| 104 | 14-sep-09 | 1012.00                 | 865.00               | 999.00                 | 907.00                  | 10280.00         | 8850.00       | 6500.00         | 6490.00        | 5500.00           | 5020.00    | 11770.00         | 12010.00        |
| 107 | 17-sep-09 | 1004.00                 | 870.00               | 982.00                 |                         | 11750.00         | 11650.00      | 6540.00         | 6470.00        | 6550.00           | 6460.00    | 11790.00         | 11820.00        |
| 108 | 18-sep-09 | 1009.00                 | 937.00               | 921.00                 | 921.00                  | 11850.00         | 11790.00      | 6570.00         | 6550.00        | 6600.00           | 6580.00    | 11870.00         | 11990.00        |
| 111 | 21-sep-09 | 730.00                  | 681.00               |                        | 797.00                  |                  | 8790.00       | 5060.00         | 4950.00        | 5150.00           | 5010.00    | 9300.00          | 9110.00         |
| 112 | 22-sep-09 | 940.00                  | 871.00               | 879.00                 | 831.00                  | 11930.00         | 11720.00      | 6610.00         | 6390.00        | 6580.00           | 6610.00    | 11890.00         | 12120.00        |
| 113 | 23-sep-09 | 937.00                  | 877.00               | 930.00                 | 895.00                  | 11910.00         | 11790.00      | 6660.00         | 6550.00        | 6590.00           | 6590.00    | 11970.00         | 11960.00        |
| 114 | 24-sep-09 | 964.00                  | 872.00               | 923.00                 | 912.00                  | 11940.00         | 11720.00      | 6710.00         | 6570.00        | 6570.00           | 6570.00    | 11990.00         | 11930.00        |
| 115 | 25-sep-09 | 873.00                  | 1068.00              | 870.00                 | 823.00                  | 11360.00         | 11180.00      | 6260.00         | 6510.00        | 6200.00           | 6210.00    | 11250.00         | 11320.00        |
| 118 | 28-sep-09 | 869.00                  | 829.00               | 960.00                 | 809.00                  | 11570.00         | 11570.00      | 6060.00         | 6070.00        | 6320.00           | 6080.00    | 11660.00         | 11620.00        |
| 119 | 29-sep-09 | 1111.00                 | 790.00               | 1216.00                | 624.00                  | 11550.00         | 11530.00      | 6280.00         | 6090.00        | 7070.00           | 6240.00    | 11590.00         | 11630.00        |
| 120 | 30-sep-09 | 1098.00                 | 868.00               | 890.00                 | 879.00                  | 11870.00         | 11920.00      | 6530.00         | 6490.00        | 6520.00           | 6580.00    | 11890.00         | 12130.00        |
| 125 | 05-oct-09 | 1033.00                 | 1107.00              | 1179.00                | 1090.00                 | 10970.00         | 11080.00      | 7250.00         | 7110.00        | 7160.00           | 7090.00    | 11200.00         | 11110.00        |
| 126 | 06-oct-09 | 813.00                  |                      |                        |                         |                  | 9540.00       | 5220.00         | 6860.00        | 9540.00           | 5180.00    | 8000.00          | 5290.00         |
| 127 | 07-oct-09 | 864.00                  | 848.00               | 911.00                 |                         | 13460.00         | 7340.00       | 7290.00         |                | 7300.00           | 7090.00    | 13290.00         | 13250.00        |
| 128 | 08-oct-09 | 968.00                  | 898.00               | 1048.00                | 916.00                  | 13460.00         | 7480.00       | 7640.00         | 7590.00        | 7820.00           | 7780.00    | 13390.00         | 13360.00        |



**Parámetro medido: Conductividad eléctrica  $\mu\text{S}/\text{cm}$**

|                     |              | <b>Módulo I</b>                |                             |                               |                                | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|---------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b>          | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 133                 | 13-oct-09    | 816.00                         | 818.00                      | 765.00                        | 748.00                         | 10840.00                | 7800.00              | 6300.00                | 6630.00               | 6130.00                  | 6520.00           | 10740.00                | 10860.00               |
| 135                 | 15-oct-09    | 1013.00                        | 970.00                      | 974.00                        | 934.00                         | 13700.00                | 13660.00             | 7290.00                | 7200.00               | 7380.00                  | 7330.00           | 13730.00                | 13560.00               |
| 136                 | 16-oct-09    | 990.00                         | 976.00                      | 995.00                        | 946.00                         | 13800.00                | 9840.00              | 1629.00                | 7560.00               | 7620.00                  | 7600.00           | 14330.00                | 14280.00               |
| 139                 | 19-oct-09    | 1222.00                        | 1050.00                     | 1216.00                       | 1044.00                        | 14840.00                | 15070.00             | 8100.00                | 7900.00               | 8170.00                  | 8210.00           | 14770.00                | 15110.00               |
| 140                 | 20-oct-09    |                                | 1135.00                     | 1115.00                       | 1074.00                        | 11750.00                | 5000.00              | 8560.00                | 8620.00               | 8610.00                  | 8560.00           | 15360.00                | 15410.00               |
| 141                 | 21-oct-09    | 980.00                         | 1150.00                     |                               | 1124.00                        | 10097.00                | 6800.00              | 7200.00                | 4130.00               | 10140.00                 | 9270.00           | 8620.00                 | 7890.00                |
| 143                 | 23-oct-09    | 815.00                         | 771.00                      | 1220.00                       | 796.00                         | 11570.00                | 11610.00             | 6440.00                | 6380.00               | 6410.00                  | 6400.00           | 11570.00                | 11550.00               |
| 148                 | 28-oct-09    | 883.00                         | 868.00                      |                               |                                | 11370.00                | 12170.00             | 6590.00                | 6670.00               | 6670.00                  | 6650.00           |                         |                        |
| 155                 | 04-nov-09    | 912.00                         | 1082.00                     |                               |                                | 11270.00                | 11130.00             | 7070.00                | 7080.00               | 7090.00                  | 6630.00           |                         |                        |
| Media               |              | 971.15                         | 925.24                      | 1012.00                       | 928.65                         | 12508.95                | 11142.50             | 8598.16                | 8028.51               | 7181.46                  | 6930.91           | 10908.75                | 10551.43               |
| Desviación estándar |              | 112.51                         | 125.35                      | 129.07                        | 160.62                         | 1474.14                 | 2379.65              | 3506.78                | 3002.19               | 1073.57                  | 1044.30           | 2111.88                 | 2674.48                |

**Parámetro medido: Sólidos disueltos totales (mg/L)**

|            |              | <b>Módulo I</b>                |                             |                               |                                | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b> | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 62         | 03-ago-09    | 606.00                         | 606.00                      | 573.00                        | 527.00                         | 8290.00                 | 7450.00              | 7220.00                |                       | 4340.00                  | 3670.00           | 4710.00                 | 4280.00                |
| 63         | 04-ago-09    | 535.00                         | 548.00                      | 651.00                        |                                | 7700.00                 | 6860.00              | 8130.00                |                       | 4030.00                  | 4510.00           | 4780.00                 | 4720.00                |
| 64         | 05-ago-09    | 551.00                         | 551.00                      | 510.00                        | 467.00                         | 8110.00                 | 7500.00              | 8170.00                |                       | 4490.00                  | 4160.00           | 4600.00                 | 4550.00                |
| 65         | 06-ago-09    | 551.00                         | 551.00                      | 508.00                        | 464.00                         | 8220.00                 | 8070.00              | 8180.00                |                       | 4510.00                  | 4200.00           | 4520.00                 | 4530.00                |
| 66         | 07-ago-09    | 521.00                         | 521.00                      | 672.00                        | 622.00                         | 8240.00                 | 6400.00              | 7050.00                | 5050.00               |                          | 4580.00           | 5060.00                 | 7090.00                |
| 76         | 17-ago-09    | 516.00                         | 516.00                      | 497.00                        |                                | 8300.00                 | 6960.00              | 7340.00                |                       | 4580.00                  |                   | 5410.00                 | 5320.00                |
| 77         | 18-ago-09    | 690.00                         | 690.00                      | 502.00                        | 516.00                         | 8270.00                 | 4520.00              | 8290.00                |                       | 4550.00                  |                   | 4590.00                 | 4700.00                |
| 78         | 19-ago-09    | 533.00                         | 533.00                      | 652.00                        |                                | 8260.00                 | 4530.00              | 7180.00                |                       |                          |                   | 4990.00                 | 5090.00                |
| 79         | 20-ago-09    | 407.00                         | 407.00                      | 399.00                        | 393.00                         | 6320.00                 |                      | 6310.00                |                       | 3770.00                  | 3330.00           | 3370.00                 |                        |
| 80         | 21-ago-09    | 525.00                         | 525.00                      | 488.00                        | 484.00                         |                         | 7920.00              | 8400.00                |                       | 4510.00                  | 4410.00           | 4480.00                 | 4490.00                |
| 83         | 24-ago-09    | 470.00                         | 470.00                      | 491.00                        | 468.00                         | 6880.00                 | 7550.00              | 7350.00                |                       | 3600.00                  | 3470.00           | 3940.00                 | 3690.00                |

**Parámetro medido: Sólidos disueltos totales (mg/L)**

|            |              | <b>Módulo I</b>                |                             |                               |                                | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b> | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 84         | 25-ago-09    | 476.00                         | 476.00                      | 463.00                        | 444.00                         | 6930.00                 | 7320.00              | 7140.00                |                       | 3760.00                  | 3760.00           | 3700.00                 | 3820.00                |
| 85         | 26-ago-09    | 506.00                         | 506.00                      | 437.00                        | 427.00                         | 6060.00                 | 6590.00              | 6760.00                |                       | 4480.00                  | 3940.00           | 3460.00                 | 3510.00                |
| 91         | 01-sep-09    | 485.00                         | 485.00                      | 492.00                        | 449.00                         | 6420.00                 | 6540.00              | 3420.00                | 3450.00               | 3470.00                  | 3340.00           | 6440.00                 | 6570.00                |
| 92         | 02-sep-09    | 499.00                         | 499.00                      | 476.00                        | 450.00                         | 6340.00                 | 6410.00              | 3480.00                | 3530.00               | 3490.00                  | 3550.00           | 6430.00                 | 7630.00                |
| 93         | 03-sep-09    | 507.00                         | 507.00                      | 480.00                        | 418.00                         | 6460.00                 | 6420.00              | 3470.00                | 3500.00               | 3490.00                  | 3510.00           | 6490.00                 | 6510.00                |
| 94         | 04-sep-09    | 491.00                         | 491.00                      | 503.00                        | 314.00                         | 6450.00                 | 6010.00              | 3580.00                | 2170.00               | 3450.00                  | 3460.00           | 6520.00                 | 3920.00                |
| 97         | 07-sep-09    | 467.00                         | 467.00                      | 498.00                        | 466.00                         | 6520.00                 | 6730.00              | 3530.00                | 3500.00               | 3390.00                  | 3460.00           | 7360.00                 | 7090.00                |
| 100        | 10-sep-09    | 453.00                         | 453.00                      | 447.00                        | 415.00                         | 6400.00                 | 6470.00              | 3320.00                | 3310.00               | 3360.00                  | 3330.00           | 6440.00                 | 6510.00                |
| 101        | 11-sep-09    | 341.00                         | 341.00                      | 349.00                        | 328.00                         |                         | 4880.00              | 2650.00                | 2600.00               |                          | 2640.00           | 4880.00                 | 9090.00                |
| 104        | 14-sep-09    | 497.00                         | 497.00                      | 491.00                        | 444.00                         |                         | 5380.00              | 3440.00                | 3430.00               | 2800.00                  | 2960.00           | 6500.00                 | 6630.00                |
| 107        | 17-sep-09    | 492.00                         | 492.00                      | 482.00                        | 462.00                         | 6480.00                 | 6430.00              | 3460.00                | 3420.00               | 3470.00                  | 3420.00           | 6500.00                 | 6520.00                |
| 108        | 18-sep-09    | 495.00                         | 495.00                      | 451.00                        | 451.00                         | 6530.00                 | 6500.00              | 3480.00                | 3460.00               | 3490.00                  | 3480.00           | 6550.00                 | 6620.00                |
| 111        | 21-sep-09    | 356.00                         | 356.00                      | 332.00                        | 389.00                         |                         | 4760.00              | 2660.00                | 2590.00               | 2710.00                  | 2630.00           | 5050.00                 | 4940.00                |
| 112        | 22-sep-09    | 462.00                         | 462.00                      | 430.00                        | 406.00                         | 6590.00                 | 6460.00              | 3500.00                | 3380.00               | 3480.00                  | 3500.00           | 6560.00                 | 6700.00                |
| 113        | 23-sep-09    | 459.00                         | 459.00                      | 456.00                        | 438.00                         | 6580.00                 | 6510.00              | 3520.00                | 3470.00               | 3490.00                  | 3490.00           | 6610.00                 | 6610.00                |
| 114        | 24-sep-09    | 472.00                         | 472.00                      | 452.00                        | 447.00                         | 6600.00                 | 6460.00              | 3550.00                | 3480.00               | 3470.00                  | 3470.00           | 6620.00                 | 6590.00                |
| 115        | 25-sep-09    | 427.00                         | 427.00                      | 426.00                        | 402.00                         | 6040.00                 | 6140.00              | 3310.00                | 3440.00               | 3280.00                  | 3280.00           | 6190.00                 | 6220.00                |
| 118        | 28-sep-09    | 425.00                         | 425.00                      | 471.00                        | 395.00                         | 6370.00                 | 6370.00              | 3200.00                | 3200.00               | 3340.00                  | 3210.00           | 6430.00                 | 6410.00                |
| 119        | 29-sep-09    | 547.00                         | 547.00                      | 600.00                        | 330.00                         | 6360.00                 | 6350.00              | 3300.00                | 3220.00               | 3790.00                  | 3300.00           | 6390.00                 | 6410.00                |
| 120        | 30-sep-09    | 540.00                         | 540.00                      | 401.00                        | 415.00                         | 6190.00                 | 6460.00              | 6470.00                | 3340.00               | 3810.00                  | 3820.00           |                         | 6770.00                |
| 121        | 01-oct-09    | 464.00                         | 464.00                      | 413.00                        | 407.00                         | 6470.00                 | 6590.00              | 3450.00                | 3350.00               | 3450.00                  | 3440.00           | 6490.00                 | 6610.00                |
| 122        | 02-oct-09    | 451.00                         | 451.00                      | 428.00                        | 492.00                         | 6330.00                 | 6030.00              | 3680.00                | 3320.00               | 3190.00                  | 3410.00           | 5990.00                 | 6510.00                |
| 125        | 05-oct-09    | 508.00                         | 508.00                      | 581.00                        | 531.00                         | 6030.00                 | 6070.00              | 3860.00                | 3770.00               | 3810.00                  | 3770.00           | 6150.00                 | 6110.00                |
| 127        | 07-oct-09    | 422.00                         | 422.00                      | 438.00                        | 410.00                         | 7490.00                 | 4800.00              | 4600.00                | 4190.00               | 3890.00                  |                   | 7360.00                 | 7400.00                |
| 128        | 08-oct-09    | 475.00                         | 475.00                      | 515.00                        | 499.00                         | 7490.00                 |                      | 4080.00                | 4060.00               | 4190.00                  | 4170.00           | 7950.00                 | 7440.00                |
| 133        | 13-oct-09    | 397.00                         | 397.00                      | 373.00                        | 364.00                         | 5940.00                 |                      | 3330.00                | 3520.00               | 3240.00                  | 3450.00           | 5880.00                 | 5950.00                |

**Parámetro medido: Sólidos disueltos totales (mg/L)**

|                     |              | <b>Módulo I</b>                |                             |                               |                                | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|---------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b>          | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 135                 | 15-oct-09    | 498.00                         | 498.00                      | 465.00                        | 457.00                         | 7640.00                 | 7620.00              | 3880.00                | 3830.00               | 3930.00                  | 3900.00           | 7660.00                 | 7560.00                |
| 136                 | 16-oct-09    | 482.00                         | 482.00                      | 488.00                        | 464.00                         |                         |                      | 812.00                 | 4040.00               | 4070.00                  | 4060.00           | 8010.00                 | 7980.00                |
| 139                 | 19-oct-09    | 603.00                         | 603.00                      | 600.00                        | 513.00                         | 8320.00                 | 8450.00              | 4350.00                | 4240.00               | 4400.00                  | 4410.00           | 8280.00                 | 8480.00                |
| 140                 | 20-oct-09    | 610.00                         | 610.00                      | 549.00                        | 528.00                         | 6460.00                 |                      | 4630.00                | 4640.00               |                          | 4620.00           | 8640.00                 | 8660.00                |
| 141                 | 21-oct-09    | 480.00                         | 480.00                      | 721.00                        | 554.00                         | 6040.00                 |                      | 6120.00                | 2150.00               |                          |                   | 4660.00                 | 4240.00                |
| 143                 | 23-oct-09    | 398.00                         | 398.00                      | 409.00                        | 389.00                         | 6370.00                 | 6400.00              | 3400.00                | 3380.00               | 3390.00                  |                   | 6370.00                 | 6370.00                |
| 148                 | 28-oct-09    | 465.00                         | 465.00                      | 470.00                        | 459.00                         | 6000.00                 | 6640.00              | 3160.00                | 3310.00               | 3160.00                  | 3460.00           | 5470.00                 | 5140.00                |
| 155                 | 04-nov-09    | 480.00                         | 480.00                      | 451.00                        | 476.00                         | 5980.00                 | 6670.00              | 3070.00                | 3400.00               | 3430.00                  | 3400.00           | 5580.00                 | 5420.00                |
| 162                 | 11-nov-09    | 495.00                         | 495.00                      | 445.00                        | 470.00                         | 6120.00                 | 6730.00              | 3090.00                | 3470.00               | 3290.00                  | 3460.00           | 5560.00                 | 5510.00                |
| 169                 | 18-nov-09    | 450.00                         | 450.00                      | 668.00                        |                                | 6240.00                 | 6730.00              | 3490.00                | 3520.00               | 3580.00                  | 3510.00           | 4730.00                 |                        |
| 174                 | 23-nov-09    | 593.00                         | 593.00                      | 613.00                        | 604.00                         | 6170.00                 | 6130.00              | 3750.00                | 3760.00               | 3770.00                  | 3510.00           |                         |                        |
| Media               |              | 491.10                         | 491.38                      | 493.90                        | 451.09                         | 6813.95                 | 6471.67              | 4658.58                | 3485.83               | 3702.09                  | 3629.76           | 5877.17                 | 6064.67                |
| Desviación estándar |              | 65.02                          | 65.23                       | 85.76                         | 64.65                          | 811.14                  | 888.17               | 1945.98                | 565.32                | 475.66                   | 463.01            | 1269.17                 | 1374.67                |

**Parámetro medido: DQO (mg/L)**

|            |              | <b>Módulo I</b>                |                             |                               |                                | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b> | <b>Fecha</b> | <b>Influyente Semiblanqueo</b> | <b>Humedal semiblanqueo</b> | <b>Biofiltro semiblanqueo</b> | <b>Biof - hum semiblanqueo</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 62         | 03-ago-09    | 552.20                         |                             | 11.52                         |                                | 478.10                  | 307.76               | 298.13                 | 248.26                | 484.60                   | 156.68            | 83.85                   | 121.13                 |
| 63         | 04-ago-09    | 714.59                         |                             | 50.03                         |                                | 523.52                  | 458.59               |                        |                       | 631.65                   | 494.88            | 309.24                  | 142.11                 |
| 64         | 05-ago-09    | 737.06                         | 109.77                      | 35.96                         | 16.46                          | 551.17                  | 336.40               | 412.43                 | 314.92                | 554.87                   | 400.33            | 165.32                  | 193.95                 |
| 65         | 06-ago-09    | 652.14                         |                             |                               |                                |                         |                      |                        |                       | 658.06                   | 437.61            | 279.37                  | 209.98                 |
| 67         | 08-ago-09    | 645.89                         | 161.20                      |                               |                                | 652.12                  | 306.77               | 267.77                 | 270.09                | 557.59                   | 291.96            | 58.92                   | 56.40                  |
| 76         | 17-ago-09    | 681.76                         |                             |                               |                                | 644.24                  | 342.76               | 298.72                 | 253.48                | 771.87                   | 583.26            | 459.08                  | 430.20                 |
| 77         | 18-ago-09    | 659.54                         |                             |                               |                                |                         |                      | 311.96                 | 312.77                | 839.75                   | 305.04            | 131.25                  |                        |
| 78         | 19-ago-09    | 645.12                         | 166.80                      |                               |                                |                         |                      |                        |                       |                          | 383.30            | 488.71                  |                        |
| 79         | 20-ago-09    | 697.56                         |                             |                               |                                | 553.64                  | 148.53               | 234.56                 | 189.98                |                          | 382.31            | 144.58                  |                        |
| 80         | 21-ago-09    | 638.90                         | 152.22                      |                               |                                |                         |                      |                        | 376.11                |                          | 523.45            | 321.43                  | 210.03                 |
| 88         | 29-ago-09    | 442.30                         | 116.24                      |                               |                                | 456.22                  | 419.70               | 322.20                 | 334.95                | 498.22                   | 355.62            | 226.66                  | 190.33                 |

|                     |           |        |        |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------|-----------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 91                  | 01-sep-09 | 677.81 |        |       |       | 601.78 | 530.68 | 350.22 |        | 727.92 | 413.02 | 492.17 |        |
| 97                  | 07-sep-09 | 501.29 | 98.31  | 15.03 | 6.77  | 417.77 | 388.51 | 102.09 | 91.23  | 524.17 | 278.80 | 317.97 | 274.55 |
| 104                 | 14-sep-09 | 400.54 | 83.92  | 14.32 | 2.29  | 448.98 | 395.99 | 136.80 | 115.10 | 490.00 | 212.97 | 264.88 | 278.80 |
| 108                 | 18-sep-09 | 380.25 | 112.94 | 14.79 | 11.73 | 427.44 | 290.36 | 175.93 | 137.95 | 364.21 | 232.21 | 295.32 | 287.77 |
| 111                 | 21-sep-09 | 505.53 | 46.64  | 9.84  | 9.37  | 418.24 | 291.78 | 81.80  | 112.70 | 504.23 | 175.47 | 277.62 | 302.16 |
| 112                 | 22-sep-09 | 278.56 | 43.81  | 4.88  | 10.78 | 394.17 | 279.75 | 135.83 | 103.03 | 309.24 | 162.49 | 286.35 | 277.86 |
| 115                 | 25-sep-09 | 361.85 | 101.38 | 8.66  | 0.64  | 595.66 | 399.13 | 296.02 | 117.66 |        | 187.97 | 287.30 | 256.15 |
| 118                 | 28-sep-09 | 482.88 | 52.31  | 16.68 | 2.05  | 460.47 | 356.19 | 135.35 | 95.48  | 387.57 | 121.91 | 343.21 | 276.21 |
| 119                 | 29-sep-09 | 384.26 | 88.88  | 9.13  | 13.38 | 529.36 | 435.46 | 199.29 | 172.16 | 435.70 | 257.57 | 403.61 | 388.27 |
| 122                 | 02-oct-09 | 154.23 | 53.25  | 26.59 | 3.00  | 431.69 | 305.70 | 148.57 | 141.25 | 280.69 | 160.13 | 280.00 | 280.69 |
| 135                 | 13-oct-09 | 292.25 | 28.24  | 23.76 | 22.11 | 382.85 | 276.42 | 168.62 | 179.47 | 414.16 | 220.05 | 308.53 | 285.17 |
| 137                 | 15-oct-09 | 310.18 | 11.49  | 4.41  | 3.31  | 441.12 | 353.86 | 153.05 | 124.27 | 375.06 | 214.65 | 374.65 | 289.89 |
| 138                 | 16-oct-09 | 287.36 | 16.92  | 40.04 | 12.52 | 602.32 | 438.06 | 163.19 | 165.79 | 297.68 | 165.32 | 295.32 | 297.68 |
| 146                 | 26-oct-09 | 240.59 | 80.01  | 33.81 | 20.46 | 455.34 | 362.12 | 188.85 | 168.11 | 464.13 | 188.60 | 318.92 | 336.25 |
| 153                 | 02-nov-09 | 324.05 |        |       |       | 429.72 | 337.96 | 233.26 | 243.76 | 423.37 | 259.65 | 317.45 | 211.56 |
| 162                 | 11-nov-09 | 331.83 | 71.95  | 19.48 | 4.60  | 488.04 | 293.54 | 207.15 | 161.03 | 341.62 | 213.98 | 345.88 | 187.53 |
| 169                 | 18-nov-09 | 293.05 | 151.27 | 17.99 | 3.20  | 496.10 | 459.73 | 189.58 | 242.78 | 411.17 | 258.40 | 106.61 | 105.39 |
| 174                 | 23-nov-09 | 228.14 | 106.61 | 15.12 | 5.70  | 527.33 | 399.46 | 166.15 | 228.87 | 338.20 | 301.60 | 74.88  | 89.23  |
| 175                 | 24-nov-09 | 274.02 | 86.60  | 16.76 | 7.75  | 455.83 | 302.82 | 200.07 | 232.04 | 393.60 | 244.73 | 68.54  | 65.32  |
| Media               |           | 459.19 | 88.22  | 19.44 | 8.67  | 494.74 | 354.54 | 214.52 | 197.43 | 479.97 | 286.13 | 270.92 | 232.48 |
| Desviación estándar |           | 177.79 | 45.35  | 12.20 | 6.42  | 77.00  | 78.44  | 82.51  | 80.62  | 147.20 | 119.24 | 120.34 | 95.09  |

**Parámetro medido: Color aparente (UPt/Co)**

| Día | Fecha     | Módulo II        |               |                 |                | Módulo III        |            |                  |                 |
|-----|-----------|------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|------------|------------------|-----------------|
|     |           | Influyente color | Humedal color | Biofiltro color | Biof-hum color | Influyente Mezcla | Hum mezcla | Biofiltro mezcla | Hum-Biof mezcla |
| 76  | 17-ago-09 | 5750             | 5750          | 5550            | 1700           | 4250              | 4230       | 3400             | 4200            |
| 77  | 18-ago-09 | 6950             | 6300          | 5300            | 5600           |                   | 4450       | 5750             | 4700            |
| 78  | 19-ago-09 | 4800             | 2920          | 2240            | 4720           |                   | 1110       | 1120             | 1115            |
| 79  | 20-ago-09 | 8600             | 2450          | 2475            | 2575           | 4725              | 1600       | 2675             | 2875            |
| 80  | 21-ago-09 | 8760             | 4120          | 5440            | 7160           | 5240              | 2920       | 2240             | 2640            |
| 84  | 25-ago-09 | 4525             | 4520          | 2300            | 1925           | 2220              | 2210       | 2120             |                 |

**Parámetro medido: Color aparente (UPt/Co)**

|            |              | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|------------|--------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b> | <b>Fecha</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 88         | 29-ago-09    | 6320                    | 4320                 | 4520                   | 5000                  | 3200                     | 3180              | 3200                    | 3120                   |
| 92         | 02-sep-09    | 7120                    | 7110                 | 1760                   | 4160                  | 2320                     | 1200              | 680                     | 2200                   |
| 100        | 10-sep-09    | 10440                   | 10440                | 1120                   | 1640                  | 4440                     | 4000              | 3800                    | 3600                   |
| 101        | 11-sep-09    | 10520                   | 8840                 | 2690                   | 5360                  | 5280                     | 2640              | 5260                    |                        |
| 104        | 14-sep-09    | 2400                    | 2400                 | 1460                   | 1660                  | 3120                     | 3110              | 2750                    | 2880                   |
| 107        | 17-sep-09    | 3520                    | 3515                 | 920                    | 1520                  | 1720                     | 1710              | 1710                    | 1710                   |
| 108        | 18-sep-09    | 3200                    | 3190                 | 1160                   | 1160                  | 2080                     | 1280              | 2075                    | 2070                   |
| 111        | 21-sep-09    | 7480                    | 7000                 | 2560                   | 1800                  |                          | 4120              | 5050                    | 3600                   |
| 112        | 22-sep-09    | 4200                    | 4195                 | 2400                   | 1920                  | 2720                     | 2700              | 2710                    | 2710                   |
| 113        | 23-sep-09    | 4700                    | 4700                 | 1840                   | 2140                  | 2240                     | 2240              | 2240                    | 2230                   |
| 114        | 24-sep-09    | 4560                    | 4120                 | 1320                   | 1480                  | 1640                     | 1635              | 1625                    | 1620                   |
| 115        | 25-sep-09    | 4250                    | 4040                 | 600                    | 960                   | 4200                     | 1000              | 2640                    | 2760                   |
| 118        | 28-sep-09    | 11120                   | 11115                | 2280                   | 2400                  |                          | 3520              | 6030                    |                        |
| 119        | 29-sep-09    | 9325                    | 9320                 | 1950                   | 1950                  | 3300                     | 3300              | 3290                    | 3290                   |
| 120        | 30-sep-09    | 6350                    | 5500                 | 1800                   | 2350                  | 2775                     | 2575              | 2770                    | 2770                   |
| 121        | 01-oct-09    | 5350                    | 5340                 | 1500                   | 1400                  | 2850                     | 2840              | 2830                    | 2830                   |
| 125        | 05-oct-09    | 3025                    | 3020                 | 1800                   | 1775                  | 1875                     | 1875              | 1870                    | 1870                   |
| 126        | 06-oct-09    | 3750                    | 3730                 | 1900                   | 1775                  |                          | 4025              | 6425                    |                        |
| 127        | 07-oct-09    | 11100                   | 10775                | 1825                   | 1375                  | 2125                     | 2120              | 2115                    | 2115                   |
| 128        | 08-oct-09    | 9350                    | 9330                 | 2325                   | 2300                  | 3750                     | 3575              | 3740                    | 3740                   |
| 135        | 15-oct-09    | 11950                   | 11940                | 4675                   | 3650                  | 5100                     | 5070              | 5080                    |                        |
| 136        | 16-oct-09    | 10750                   | 10745                | 3700                   | 3775                  | 3075                     | 3070              | 3070                    | 3070                   |
| 139        | 19-oct-09    | 8375                    | 8370                 | 2625                   | 2925                  | 1550                     | 1540              | 1540                    | 1540                   |

**Parámetro medido: Color aparente (UPt/Co)**

|                     |              | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|---------------------|--------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b>          | <b>Fecha</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 140                 | 20-oct-09    | 10600                   | 9400                 | 3225                   | 3125                  | 4050                     | 4040              | 4045                    | 4040                   |
| 141                 | 21-oct-09    | 11025                   | 11025                | 3450                   | 2825                  | 3700                     | 3680              | 3690                    | 3685                   |
| 148                 | 28-oct-09    | 11600                   | 11580                | 5720                   | 5800                  | 4100                     | 4080              | 2550                    | 2300                   |
| 155                 | 04-nov-09    | 10350                   | 10170                | 6340                   | 6450                  | 4470                     | 4460              | 3300                    | 3350                   |
| 162                 | 11-nov-09    | 11880                   | 11870                | 5380                   | 5180                  | 4900                     | 4300              | 2600                    | 2700                   |
| 169                 | 18-nov-09    | 11550                   | 11220                | 4400                   | 4100                  | 3320                     | 3310              | 1590                    | 1430                   |
| 174                 | 24-nov-09    | 10290                   | 10280                | 3880                   | 3700                  | 4080                     | 3220              | 3600                    | 3550                   |
| Media               |              | 7662.08                 | 7073.89              | 2900.83                | 3037.08               | 3368.23                  | 2942.64           | 3088.33                 | 2784.19                |
| Desviación estándar |              | 3085.71                 | 3265.44              | 1578.59                | 1671.63               | 1144.51                  | 1115.70           | 1389.63                 | 876.97                 |

**Parámetro medido: Color verdadero (UPt/Co)**

|            |              | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|------------|--------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b> | <b>Fecha</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 62         | 03-ago-09    | 3200                    | 3200                 | 2720                   | 3190                  | 3800                     | 3240              | 1080                    | 1080                   |
| 76         | 17-ago-09    | 2100                    | 2095                 | 2100                   | 1300                  | 3550                     | 3540              | 1850                    | 2100                   |
| 77         | 18-ago-09    | 5250                    | 4300                 | 3100                   | 3150                  | 3050                     | 3045              | 3050                    | 3050                   |
| 78         | 19-ago-09    | 4640                    | 2680                 | 960                    | 2080                  |                          | 3560              | 3560                    | 1950                   |
| 79         | 20-ago-09    | 4550                    | 2975                 | 3625                   | 2725                  | 4675                     | 1575              | 2050                    | 2125                   |
| 80         | 21-ago-09    | 9240                    | 4160                 | 4160                   | 4960                  | 4160                     | 1280              | 3240                    | 3320                   |
| 84         | 25-ago-09    | 7200                    | 2680                 | 3890                   | 3040                  | 3240                     |                   | 3230                    | 2320                   |
| 88         | 29-ago-09    | 6240                    | 4280                 | 4320                   | 4560                  | 3200                     | 960               | 3190                    | 3080                   |
| 92         | 02-sep-09    | 4600                    | 4590                 | 3080                   | 2280                  | 1560                     | 1560              | 1550                    | 1550                   |
| 100        | 10-sep-09    | 8960                    | 8720                 | 1960                   | 2700                  | 3840                     | 1960              | 3800                    | 3830                   |
| 101        | 11-sep-09    | 10320                   | 10310                | 1480                   | 1400                  | 4480                     | 4080              | 3520                    | 3520                   |

**Parámetro medido: Color verdadero (UPt/Co)**

|                     |              | <b>Módulo II</b>        |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>        |                   |                         |                        |
|---------------------|--------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b>          | <b>Fecha</b> | <b>Influyente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influyente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 104                 | 14-sep-09    | 4260                    | 4255                 | 1460                   | 1480                  | 2980                     | 2970              | 2760                    | 2880                   |
| 107                 | 17-sep-09    | 3000                    | 2990                 | 720                    | 1240                  | 1320                     | 1310              | 1310                    | 1310                   |
| 108                 | 18-sep-09    | 3880                    | 3875                 | 920                    | 960                   | 1680                     | 1320              | 1675                    | 1675                   |
| 111                 | 21-sep-09    | 6880                    | 6760                 | 2120                   | 1600                  |                          | 3880              | 4080                    | 3320                   |
| 112                 | 22-sep-09    | 4040                    | 4030                 | 1920                   | 1520                  | 2440                     | 2435              | 2440                    | 2430                   |
| 113                 | 23-sep-09    | 4680                    | 4660                 | 1840                   | 1820                  | 1660                     | 1650              | 1650                    | 1650                   |
| 114                 | 24-sep-09    | 3840                    | 3830                 | 1040                   | 1560                  | 1400                     | 1390              | 1395                    | 1390                   |
| 115                 | 25-sep-09    | 4920                    | 3680                 | 480                    | 280                   | 2240                     | 920               | 2240                    | 2235                   |
| 118                 | 28-sep-09    | 10720                   | 10710                | 2120                   | 1720                  |                          | 3520              | 5955                    |                        |
| 119                 | 29-sep-09    | 2912                    | 2910                 | 616                    | 624                   |                          | 950               | 950                     | 945                    |
| 120                 | 30-sep-09    | 5825                    | 4500                 | 1200                   | 1120                  | 1290                     | 1290              | 1285                    | 1280                   |
| 125                 | 05-oct-09    | 3100                    | 3095                 | 1725                   | 1650                  | 1425                     | 1420              | 1420                    | 1415                   |
| 126                 | 06-oct-09    | 3350                    | 3345                 | 1925                   | 1700                  |                          |                   | 3775                    | 3875                   |
| 127                 | 07-oct-09    | 10775                   | 8625                 |                        | 1375                  | 1750                     | 1740              | 1745                    | 1740                   |
| 128                 | 08-oct-09    | 9250                    | 9235                 | 2425                   | 2125                  | 3575                     | 3525              | 3570                    | 3565                   |
| 135                 | 15-oct-09    | 11800                   | 11790                | 3400                   | 3075                  | 4800                     |                   | 4795                    |                        |
| 136                 | 16-oct-09    | 10700                   | 10690                | 3150                   | 3775                  | 3000                     | 2995              | 3000                    | 2990                   |
| 139                 | 19-oct-09    | 12000                   | 10225                | 2550                   | 2775                  | 1500                     | 1490              | 1495                    | 1490                   |
| 140                 | 20-oct-09    | 10525                   | 9375                 | 3275                   | 2875                  | 4000                     | 3995              | 4000                    | 3995                   |
| 141                 | 21-oct-09    | 10050                   | 10040                | 3400                   | 2800                  | 3725                     | 3500              | 3720                    | 3720                   |
| 148                 | 28-oct-09    | 11700                   | 11685                | 3200                   | 3250                  | 4200                     | 4200              | 3780                    | 3900                   |
| 155                 | 04-nov-09    | 10400                   | 10040                | 2800                   | 2670                  | 4480                     |                   | 3890                    | 3920                   |
| 162                 | 11-nov-09    | 12380                   | 9900                 | 2320                   | 2200                  | 4900                     |                   | 4130                    | 3900                   |
| 169                 | 18-nov-09    | 11740                   | 11735                | 2990                   | 3100                  | 3680                     | 3670              | 3140                    | 3020                   |
| 174                 | 23-nov-09    | 10320                   | 9420                 | 3120                   | 2980                  | 4410                     | 4100              | 3800                    | 3860                   |
| Media               |              | 7204.08                 | 6427.50              | 2346.03                | 2268.31               | 3097.10                  | 2486.13           | 2836.67                 | 2600.88                |
| Desviación estándar |              | 3375.86                 | 3356.08              | 1044.91                | 1040.58               | 1206.75                  | 1152.40           | 1204.36                 | 1015.01                |

**Parámetro medido: Concentración de colorante Negro ciba R**

| Día                 | Fecha     | Módulo II       |               |                 |                | Módulo III       |            |                  |                 |
|---------------------|-----------|-----------------|---------------|-----------------|----------------|------------------|------------|------------------|-----------------|
|                     |           | Influente color | Humedal color | Biofiltro color | Biof-hum color | Influente Mezcla | Hum mezcla | Biofiltro mezcla | Hum-Biof mezcla |
| 63                  | 04-ago-09 | 174.66          | 159.89        | 98.78           | 106.14         | 35.66            | 35.20      | 29.76            | 35.66           |
| 64                  | 05-ago-09 | 193.13          | 153.19        | 84.66           | 92.34          | 49.63            | 40.54      | 49.11            | 42.33           |
| 73                  | 14-ago-09 | 227.58          | 171.63        | 79.68           | 83.43          | 41.27            | 40.89      | 39.68            | 39.84           |
| 76                  | 17-ago-09 | 174.49          | 142.36        | 90.21           | 100.82         | 67.73            | 55.56      | 33.23            | 25.61           |
| 80                  | 21-ago-09 | 98.95           |               | 49.90           | 51.80          | 60.58            | 59.10      | 54.16            | 53.24           |
| 83                  | 24-ago-09 | 240.57          | 165.61        | 121.26          | 138.89         | 70.19            | 52.96      | 42.51            | 55.20           |
| 94                  | 04-sep-09 | 239.11          | 146.97        | 101.55          | 20.55          | 59.43            | 57.33      | 58.55            | 40.77           |
| 98                  | 11-sep-09 | 185.23          | 137.46        | 41.48           | 61.28          | 22.63            |            | 21.89            | 20.43           |
| 105                 | 15-sep-09 | 81.65           |               | 42.34           | 30.10          |                  |            | 72.91            | 74.74           |
| 108                 | 18-sep-09 | 273.64          | 201.82        | 64.47           | 36.37          |                  | 81.18      |                  |                 |
| 118                 | 25-sep-09 | 167.81          | 163.35        | 44.92           | 40.00          | 74.74            | 72.93      | 73.11            | 72.40           |
| 122                 | 02-oct-09 | 259.08          | 214.88        | 66.42           | 65.74          |                  |            |                  |                 |
| 126                 | 09-oct-09 | 165.82          | 163.09        | 98.85           | 76.96          | 74.74            | 71.17      | 73.10            | 74.14           |
| 139                 | 16-oct-09 | 191.95          | 122.48        | 29.57           | 41.97          | 62.69            | 62.22      | 61.21            | 60.07           |
| 140                 | 23-oct-09 | 150.61          | 142.67        | 46.70           | 53.55          | 69.11            | 68.77      | 68.02            | 67.33           |
| 149                 | 30-oct-09 | 143.41          | 141.41        | 34.28           | 32.62          | 76.35            | 75.75      | 75.87            | 74.49           |
| 157                 | 06-nov-09 | 188.63          | 187.97        | 41.63           | 42.71          | 79.56            | 64.52      | 56.75            | 34.67           |
| 164                 | 13-nov-09 | 215.30          | 190.23        | 39.95           | 35.78          | 84.08            |            | 67.40            | 42.80           |
| 171                 | 20-nov-09 | 271.79          | 180.47        | 33.76           | 34.31          | 86.20            | 79.80      | 15.13            | 14.87           |
| 178                 | 27-nov-09 | 234.04          | 220.31        | 111.12          | 57.89          | 77.24            | 77.24      | 34.98            | 26.87           |
| Media               |           | 193.87          | 166.99        | 66.08           | 60.16          | 64.23            | 62.20      | 51.52            | 47.53           |
| Desviación estándar |           | 52.55           | 27.56         | 29.48           | 30.85          | 17.76            | 14.47      | 19.09            | 19.71           |



**Parámetro medido: Concentración de colorante Amarillo ciba S3R**

|                     |              | <b>Módulo II</b>       |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>       |                   |                         |                        |
|---------------------|--------------|------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b>          | <b>Fecha</b> | <b>Influente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 63                  | 04-ago-09    | 137.93                 | 124.81               | 81.28                  | 74.83                 | 37.75                   | 36.44             | 29.51                   | 33.10                  |
| 64                  | 05-ago-09    | 150.48                 | 120.44               | 69.30                  | 73.42                 | 43.53                   | 36.60             | 42.16                   | 41.63                  |
| 73                  | 14-ago-09    | 178.01                 | 135.67               | 66.41                  | 71.11                 | 37.52                   | 35.62             | 37.45                   | 37.28                  |
| 76                  | 17-ago-09    | 134.24                 | 113.89               | 72.93                  | 78.12                 | 56.82                   | 47.90             | 31.51                   | 26.40                  |
| 80                  | 21-ago-09    | 84.82                  | 71.10                | 53.20                  | 51.90                 | 55.76                   | 54.84             | 48.54                   | 49.73                  |
| 83                  | 24-ago-09    | 189.33                 | 131.32               | 98.22                  | 111.58                | 59.78                   | 47.29             | 40.30                   | 54.43                  |
| 94                  | 04-sep-09    | 206.18                 | 120.06               | 72.72                  | 8.16                  | 43.60                   | 42.00             | 40.99                   | 24.90                  |
| 98                  | 11-sep-09    | 112.68                 | 108.09               | 42.52                  | 48.86                 |                         | 25.98             | 25.47                   | 24.33                  |
| 105                 | 15-sep-09    | 153.00                 | 152.53               | 65.03                  | 65.51                 | 71.01                   | 42.09             | 41.82                   | 42.01                  |
| 108                 | 18-sep-09    | 229.82                 | 160.00               | 70.52                  | 37.10                 |                         | 69.91             | 75.46                   | 81.12                  |
| 118                 | 25-sep-09    | 132.34                 | 130.76               | 39.27                  | 39.86                 | 65.16                   | 64.20             | 64.59                   | 64.10                  |
| 122                 | 02-oct-09    | 194.08                 | 188.79               | 51.22                  | 49.96                 |                         | 73.05             | 75.95                   | 73.71                  |
| 126                 | 09-oct-09    | 126.71                 | 125.51               | 74.96                  | 57.98                 | 63.88                   | 62.18             | 55.87                   | 50.71                  |
| 139                 | 16-oct-09    | 113.82                 | 99.41                | 27.97                  | 40.46                 | 53.65                   | 53.63             | 52.22                   | 51.78                  |
| 140                 | 23-oct-09    | 96.44                  | 78.67                | 44.32                  | 48.35                 | 53.46                   | 50.29             | 51.90                   | 50.77                  |
| 149                 | 30-oct-09    | 116.70                 | 116.17               | 31.88                  | 31.55                 | 63.50                   | 61.11             | 62.48                   | 41.76                  |
| 157                 | 06-nov-09    | 129.56                 | 103.65               | 84.33                  | 85.01                 | 69.34                   | 66.37             | 33.56                   | 32.10                  |
| 164                 | 13-nov-09    | 141.26                 | 136.76               | 76.22                  | 78.93                 | 75.93                   | 65.77             | 43.56                   | 48.23                  |
| 171                 | 20-nov-09    | 167.56                 | 137.99               | 99.95                  | 87.96                 |                         | 74.53             | 78.56                   | 75.43                  |
| 178                 | 27-nov-09    | 181.00                 | 142.12               | 88.95                  | 89.35                 | 60.88                   | 58.08             | 18.33                   | 17.61                  |
| Media               |              | 148.80                 | 124.89               | 65.56                  | 61.50                 | 56.97                   | 53.39             | 47.51                   | 46.06                  |
| Desviación estándar |              | 38.20                  | 26.69                | 20.93                  | 24.46                 | 11.61                   | 13.91             | 17.12                   | 17.71                  |

**Parámetro medido: Concentración de colorante Negro ciba G**

|                     |              | <b>Módulo II</b>       |                      |                        |                       | <b>Módulo III</b>       |                   |                         |                        |
|---------------------|--------------|------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Día</b>          | <b>Fecha</b> | <b>Influente color</b> | <b>Humedal color</b> | <b>Biofiltro color</b> | <b>Biof-hum color</b> | <b>Influente Mezcla</b> | <b>Hum mezcla</b> | <b>Biofiltro mezcla</b> | <b>Hum-Biof mezcla</b> |
| 63                  | 04-ago-09    | 140.65                 | 124.04               | 69.47                  | 63.50                 | 17.49                   | 16.21             | 6.29                    | 12.07                  |
| 64                  | 05-ago-09    | 164.75                 | 128.92               | 66.47                  | 70.98                 | 36.48                   | 27.74             | 35.68                   | 34.74                  |
| 73                  | 14-ago-09    | 201.02                 | 143.49               | 62.85                  | 67.86                 | 36.43                   | 36.12             | 35.00                   | 35.45                  |
| 76                  | 17-ago-09    | 144.95                 | 120.22               | 68.44                  | 77.90                 | 47.90                   | 37.90             | 17.06                   | 47.68                  |
| 80                  | 21-ago-09    | 83.62                  | 68.30                | 41.40                  | 48.20                 | 46.99                   | 43.16             | 38.98                   | 41.34                  |
| 83                  | 24-ago-09    | 211.77                 | 142.01               | 101.07                 | 117.03                | 55.03                   | 38.10             | 29.93                   | 45.53                  |
| 94                  | 04-sep-09    | 186.96                 | 115.95               | 66.75                  | 23.17                 | 59.98                   | 59.27             | 58.89                   | 36.02                  |
| 98                  | 11-sep-09    | 142.78                 | 113.49               | 25.63                  | 43.75                 | 11.83                   | 10.78             | 11.39                   | 10.29                  |
| 105                 | 15-sep-09    | 68.10                  | 29.18                | 29.41                  | 26.50                 |                         |                   | 60.92                   | 62.85                  |
| 108                 | 18-sep-09    | 244.03                 | 174.55               | 49.14                  | 26.30                 |                         | 68.06             | 72.40                   | 82.24                  |
| 118                 | 25-sep-09    | 144.52                 | 142.84               | 35.26                  | 29.80                 | 61.05                   | 59.06             | 59.47                   | 58.88                  |
| 122                 | 02-oct-09    | 186.82                 | 123.66               | 9.71                   | 10.50                 | 47.72                   | 37.86             | 45.91                   | 46.02                  |
| 126                 | 09-oct-09    | 21.98                  | 16.32                | 3.20                   | 12.30                 | 99.45                   | 28.49             | 89.75                   | 78.90                  |
| 139                 | 16-oct-09    | 85.72                  | 62.34                | 7.08                   | 12.07                 | 10.67                   | 9.98              | 9.54                    | 9.32                   |
| 140                 | 23-oct-09    | 102.87                 | 85.09                | 31.97                  | 39.94                 | 53.46                   | 53.33             | 52.65                   | 52.68                  |
| 149                 | 30-oct-09    | 124.43                 | 123.35               | 22.43                  | 19.42                 | 59.31                   | 57.41             | 58.43                   | 57.73                  |
| 157                 | 06-nov-09    | 163.91                 | 100.34               | 88.78                  | 56.34                 |                         |                   | 104.95                  | 98.55                  |
| 164                 | 13-nov-09    | 176.24                 | 132.36               | 45.83                  | 34.22                 | 87.30                   |                   | 67.42                   | 45.30                  |
| 171                 | 20-nov-09    | 145.28                 | 143.98               | 98.68                  | 65.74                 | 45.03                   | 35.99             | 44.91                   | 42.09                  |
| 178                 | 27-nov-09    | 207.64                 | 155.42               | 90.40                  | 81.67                 | 67.87                   | 65.89             | 15.13                   | 14.67                  |
| Media               |              | 147.40                 | 112.29               | 50.70                  | 46.36                 | 49.65                   | 40.31             | 45.74                   | 45.62                  |
| Desviación estándar |              | 54.77                  | 41.11                | 30.44                  | 28.31                 | 23.68                   | 18.25             | 26.89                   | 23.97                  |

Parámetro medido: Nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>)

| Día | Fecha     | Módulo I                     |                           |                             |                         | Módulo II                    |                           |                             |                            | Módulo III           |               |                     |                    |
|-----|-----------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|---------------------|--------------------|
|     |           | Influyente AR medio blanqueo | Humedal AR medio blanqueo | Biofiltro AR medio blanqueo | Biof - hum semiblanqueo | Influyente AR baño de teñido | Humedal AR baño de teñido | Biofiltro AR baño de teñido | Biof-hum AR baño de teñido | Influyente mezcla AR | Hum mezcla AR | Biofiltro mezcla AR | Hum-Biof mezcla AR |
| 73  | 14-ago-09 | 24.00                        | 20.25                     | 8.25                        | 12.25                   | 34.25                        | 1.00                      | 5.50                        | 4.00                       | 24.50                | 0.00          | 7.00                | 0.00               |
| 76  | 17-ago-09 | 34.00                        | 25.00                     | 2.00                        | 1.00                    | 41.00                        | 4.00                      | 5.00                        | 4.00                       | 50.00                | 3.00          | 4.00                | 4.00               |
| 88  | 29-ago-09 | 26.20                        | 9.60                      | 1.20                        | 11.20                   | 33.00                        | 17.20                     | 7.40                        | 8.00                       | 30.00                | 27.60         | 19.40               | 13.60              |
| 101 | 11-sep-09 | 18.75                        | 8.25                      | 1.75                        | 0.00                    | 18.00                        | 10.50                     | 2.00                        | 2.25                       | 20.25                | 11.75         | 4.75                | 5.00               |
| 108 | 18-sep-09 | 14.50                        | 6.50                      | 0.00                        | 2.00                    | 20.50                        | 3.00                      | 15.00                       | 6.00                       | 15.00                | 10.00         | 2.50                | 5.00               |
| 112 | 22-sep-09 | 14.00                        | 3.00                      | 5.00                        | 2.00                    | 9.00                         | 3.00                      | 4.50                        | 3.00                       | 3.50                 | 4.00          | 4.00                | 1.00               |
| 115 | 25-sep-09 | 14.50                        | 2.50                      | 0.00                        | 0.75                    | 20.25                        | 8.25                      | 1.25                        | 2.50                       | 36.40                | 2.50          | 5.25                | 7.25               |
| 119 | 29-sep-09 | 14.50                        | 2.50                      | 1.00                        | 0.00                    | 25.00                        | 14.25                     | 4.25                        | 1.25                       | 15.25                | 8.75          | 7.75                | 7.50               |
| 122 | 02-oct-09 | 20.80                        | 2.20                      | 0.20                        | 0.20                    | 23.60                        | 8.40                      | 8.80                        | 4.20                       | 17.40                | 6.00          | 8.60                | 8.20               |
| 143 | 23-oct-09 | 20.20                        | 0.40                      | 1.40                        | 0.00                    | 29.60                        | 14.00                     | 4.60                        | 3.80                       | 25.80                | 6.80          | 9.60                | 8.80               |
| 149 | 29-oct-09 | 12.40                        | 6.60                      | 2.80                        | 2.80                    | 1.80                         | 0.20                      | 13.20                       | 3.60                       | 5.60                 | 6.20          | 10.20               | 10.00              |
| 160 | 09-nov-09 | 14.40                        | 2.00                      | 0.00                        | 0.60                    | 27.40                        | 12.00                     | 6.20                        | 6.00                       | 22.80                | 5.00          | 25.00               | 23.20              |

Parámetro medido: Nitrógeno total (N<sub>T</sub>)

| Día | Fecha     | Módulo I                     |                           |                             |                         | Módulo II                    |                           |                             |                            | Módulo III           |               |                     |                    |
|-----|-----------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|---------------------|--------------------|
|     |           | Influyente AR medio blanqueo | Humedal AR medio blanqueo | Biofiltro AR medio blanqueo | Biof - hum semiblanqueo | Influyente AR baño de teñido | Humedal AR baño de teñido | Biofiltro AR baño de teñido | Biof-hum AR baño de teñido | Influyente mezcla AR | Hum mezcla AR | Biofiltro mezcla AR | Hum-Biof mezcla AR |
| 73  | 14-ago-09 | 57.00                        | 55.00                     | 25.00                       | 30.00                   | 48.00                        | 45.00                     | 12.00                       | 67.00                      | 102.00               | 22.00         | 16.00               | 42.00              |
| 88  | 29-ago-09 | 135.00                       | 82.50                     | 22.50                       | 13.00                   | 155.00                       | 125.00                    | 87.50                       | 90.00                      | 145.00               | 95.00         | 90.00               | 62.50              |
| 101 | 11-sep-09 | 59.00                        | 0.00                      | 0.00                        | 0.00                    | 18.00                        | 17.00                     | 6.00                        | 7.00                       | 23.00                | 8.00          | 13.00               | 19.00              |
| 108 | 18-sep-09 | 67.50                        | 46.05                     | 31.00                       | 23.00                   | 58.50                        | 49.00                     | 60.00                       | 47.00                      | 82.00                | 58.50         | 50.50               | 30.20              |
| 112 | 22-sep-09 | 20.00                        | 3.50                      | 1.00                        | 5.00                    | 19.00                        | 18.50                     | 4.50                        | 6.00                       | 4.50                 | 12.00         | 9.00                | 11.50              |
| 115 | 25-sep-09 | 107.40                       | 104.50                    | 57.00                       | 59.70                   | 88.05                        | 67.25                     | 57.95                       | 43.50                      | 91.40                | 18.50         | 57.25               | 59.25              |
| 119 | 29-sep-09 | 51.00                        | 8.50                      | 31.70                       | 36.60                   | 33.30                        | 32.55                     | 35.25                       | 35.75                      | 33.75                | 38.75         | 60.75               | 16.50              |
| 122 | 02-oct-09 | 77.00                        | 36.00                     | 10.00                       | 2.00                    | 121.00                       | 101.00                    | 115.00                      | 108.00                     | 124.00               | 117.00        | 86.00               | 89.00              |
| 143 | 23-oct-09 | 61.70                        | 55.70                     | 2.10                        | 40.00                   | 62.30                        | 8.80                      | 45.30                       | 28.80                      | 68.30                | 78.80         | 18.70               | 31.60              |
| 149 | 29-oct-09 | 85.00                        | 5.00                      | 45.00                       | 5.00                    | 60.00                        | 75.00                     | 120.00                      | 135.00                     | 70.00                | 125.00        | 130.00              | 85.00              |
| 160 | 09-nov-09 | 17.90                        | 17.00                     | 10.40                       | 17.00                   | 30.90                        | 35.70                     | 54.96                       | 50.40                      | 38.30                | 38.50         | 38.50               | 53.70              |

## ANEXO B

---

# ANÁLISIS ESTADÍSTICO

---

En el presente experimento el objetivo fue comparar tres sistemas (humedal, biofiltro, biofiltro-humedal) para el tratamiento de tres diferentes tipos de agua residual de la industria textil distribuidos en tres módulos (Módulo I: agua de semiblanqueo, Módulo II: baño de teñido y Módulo III: mezcla de ambas), uno para cada tipo de agua, y de esta forma saber si alguno de los sistemas es mejor o son iguales entre sí para el tratamiento de un determinado tipo de agua.

Tales comparaciones se realizaron con base en un diseño completamente al azar aplicando el análisis de varianza correspondiente para cada variable de respuesta en cada módulo.

El análisis de varianza, ANDEVA (en adelante, ANDEVA), es la técnica central en el análisis de datos experimentales y señala la diferencia que deben tener las medias entre sí para concluir si hay o no un efecto de los tratamientos o si los tratamientos son estadísticamente iguales.

Como resultado del ANDEVA, se puede decidir si la hipótesis nula que propone la igualdad de medias de los tratamientos, enunciada inicialmente, se acepta o se rechaza. Cuando la hipótesis nula se rechaza, como en varios de los ANDEVAS realizados en esta investigación, es necesario hacer un análisis a detalle y ver cuáles tratamientos son diferentes o cuáles provocan la diferencia, y así determinar cuál es el que presenta mejor desempeño. Estas interrogantes se responden probando la igualdad de todos los posibles

pares de medias, para lo que se aplican los métodos de comparaciones múltiples o pruebas de rango múltiple (Gutiérrez y De La Vara, 2008).

Entre las pruebas de rango múltiple se encuentran el método Duncan y el método LSD (diferencia mínima significativa, por sus siglas en inglés). En general estas pruebas tienen un desempeño similar, aunque se dice que el método tipo LSD tiene más potencia porque es capaz de detectar diferencias más pequeñas.

En el método de Duncan se obtienen los rangos de significancia mínima con base en el error estándar. Los rangos de significancia son comparados con las diferencias observadas entre las medias muestrales. En las comparaciones donde la diferencia observada es mayor que el rango respectivo, se concluye que esas medias son significativamente diferentes. Dado que el tamaño de los tratamientos ( $n$ ) no siempre es el mismo entre los ahora estudiados; que este método es de menor potencia y que considera el desbalanceo en el tamaño de los tratamientos, se optó por aplicarlo a los datos experimentales de este trabajo para identificar cuál o cuáles sistemas de tratamiento es diferente en cada módulo, para cada variable de respuesta.

La cantidad LSD se llama diferencia mínima significativa ya que es la diferencia mínima que debe existir entre dos medias muestrales para considerar que los tratamientos correspondientes son significativamente diferentes. Así, cada diferencia de medias, muestrales en valor absoluto que sea mayor que el número tipo LSD se declara significativa. La prueba tipo LSD se aplicó a los datos experimentales para establecer el intervalo de confianza al elaborar las gráficas de medias. Las gráficas de medias se utilizaron para confirmar y esclarecer los resultados obtenidos por los otros métodos, ya que permite hacer una comparación visual y estadística de las medias de los tratamientos.

El análisis estadístico (ANDEVA, LSD, Duncan, gráficas de medias) se realizó con un intervalo de confianza del 99% aplicado a cada sistema de tratamiento.

Según Verma (2005), un valor desviado (llamado también outlier en inglés) se define como una observación en un conjunto (o subconjunto) de observaciones que no proviene de la población principal bajo estudio, se dice entonces que es contaminante.

La presencia de valores desviados hace necesaria la aplicación de pruebas de discordancia, con el fin de detectar dichos valores, eliminarlos y obtener la muestra censurada con datos

“normales”. Estas estimaciones tendrían una mayor validez en comparación con las obtenidas a partir de la muestra original que contenía los valores desviados.

Antes de la aplicación de los métodos estadísticos (ANDEVA, LSD, Duncan), los datos experimentales se sometieron a diferentes pruebas de discordancia utilizando el programa computacional DODESYS (Verma 2005), obteniendo estimaciones de los datos con mayor validez que los originales.

La siguiente tabla, presenta de manera resumida, los resultados obtenidos en el análisis estadístico, al comparar los sistemas entre sí por medio de los diferentes métodos estadísticos.

En la primera columna de la tabla se indica el parámetro o variable de respuesta medida; por medio de ésta se hace la comparación de los sistemas en cada módulo. La columna 2, indica el módulo en el que se aplicó el análisis (Módulo I = MI, Módulo II = MII, Módulo III = MIII). Las dos siguientes columnas muestran el resultado obtenido al aplicar el análisis de varianza (significativa, si la diferencia entre el desempeño de los sistemas fue significativa; no significativa, si no hay diferencia significativa entre los sistemas de tratamiento probados). Para la obtención de los resultados de la primera de estas columnas, se consideró el total de datos experimentales sin haberles aplicado ninguna prueba de significancia que descartara los valores desviados. En la segunda columna se aplicó el ANDEVA utilizando los datos experimentales después de haber sido sometidos a una serie de pruebas de significancia y, de haber por ello, eliminado los valores desviados. Posteriormente se realizaron las comparaciones de rangos múltiples para que, después de haber sido rechazada la hipótesis nula en alguno de los módulos por el ANDEVA, se estudiaran a detalle los sistemas de tratamiento y determinar cuáles son diferentes entre sí. Para ello se aplicaron tres métodos: método de Duncan, el método tipo LSD y las gráficas de medias.

Para ello se aplicaron tres métodos: método de Duncan, el método tipo LSD y las gráficas de medias

| Parámetro       | Módulo | Resultado del ANDEVA para cada módulo | Análisis realizado con pruebas de rangos múltiples |                         |                  | Análisis de pares de medias |                  |              |                   |
|-----------------|--------|---------------------------------------|--|-------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|--------------|-------------------|
|                 |        |                                       | LSD  | Gráfica de medias (S/c) | Duncan (S/c)     | Pares de medias             | Duncan           |              | Gráfica de medias |
| Negro R         | M II   | Significativa                         | Significativa                                      | Significativa           | Significativa    | $\mu_1 - \mu_2$             | Significativa    | I $\neq$ II  | I $\neq$ II       |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | Significativa    | I $\neq$ III | I $\neq$ III      |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
|                 | M III  | No significativa                      | No significativa                                   | No significativa        | No significativa | $\mu_1 - \mu_2$             | No significativa | I = II       | I = II            |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | No significativa | I = III      | I = III           |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
| Negro G         | M II   | Significativa                         | Significativa                                      | Significativa           | Significativa    | $\mu_1 - \mu_2$             | Significativa    | I $\neq$ II  | I $\neq$ II       |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | Significativa    | I $\neq$ III | I $\neq$ III      |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
|                 | M III  | No significativa                      | No significativa                                   | No significativa        | No significativa | $\mu_1 - \mu_2$             | No significativa | I = II       | I = II            |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | No significativa | I = III      | I = III           |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
| Amarillo        | M II   | Significativa                         | Significativa                                      | Significativa           | Significativa    | $\mu_1 - \mu_2$             | Significativa    | I $\neq$ II  | I $\neq$ II       |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | Significativa    | I $\neq$ III | I $\neq$ III      |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
|                 | M III  | No significativa                      | No significativa                                   | No significativa        | No significativa | $\mu_1 - \mu_2$             | No significativa | I = II       | I = II            |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | No significativa | I = III      | I = III           |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
| Color aparente  | M II   | Significativa                         | Significativa                                      | Significativa           | Significativa    | $\mu_1 - \mu_2$             | Significativa    | I $\neq$ II  | I $\neq$ II       |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | Significativa    | I $\neq$ III | I $\neq$ III      |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
|                 | M III  | No significativa                      | No significativa                                   | No significativa        | No significativa | $\mu_1 - \mu_2$             | No significativa | I = II       | I = II            |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | No significativa | I = III      | I = III           |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
| Color verdadero | M II   | Significativa                         | Significativa                                      | Significativa           | Significativa    | $\mu_1 - \mu_2$             | Significativa    | I $\neq$ II  | I $\neq$ II       |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | Significativa    | I $\neq$ III | I $\neq$ III      |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |
|                 | M III  | No significativa                      | No significativa                                   | No significativa        | No significativa | $\mu_1 - \mu_2$             | No significativa | I = II       | I = II            |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_1 - \mu_3$             | No significativa | I = III      | I = III           |
|                 |        |                                       |  |                         |                  | $\mu_2 - \mu_3$             | No significativa | II = III     | II = III          |



En las columnas 5 a 8 se confirma por medio de estos métodos, la decisión de rechazar o aceptar la hipótesis nula probada con el ANDEVA en cada módulo. Por último se presentan dos secciones en dónde se expone el resultado obtenido al comparar los pares de medias de los sistemas entre sí. En la primera sección se muestra la comparación hecha por el método de Duncan, en la segunda sección, se muestra el resultado obtenido por la comparación hecha con las gráficas de medias. La simbología  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ , y  $\mu_3$  representa las medias de los datos experimentales correspondientes a cada parámetro medido (DQO,color, etc) en los diferentes sistemas de tratamiento en cada módulo. Así  $\mu_1$ , es la media de los datos experimentales para un determinado parámetro en el humedal individual. La  $\mu_2$ , es la media de los datos experimentales para un determinado parámetro en el biofiltro individual y  $\mu_3$  es la media de los datos experimentales para un determinado parámetro en los sistemas combinados, biofiltro-humedal. Lo mismo aplica en los tres módulos, es decir con cada tipo de agua diferente. De esta manera,  $\mu_1-\mu_2$ , es la comparación que se está haciendo entre la media de los datos del humedal y la media de los datos del biofiltro;  $\mu_1-\mu_3$  es la comparación que se está haciendo entre la media de los datos del humedal y la media de los datos del sistema combinado, biofiltro-humedal; y,  $\mu_2-\mu_3$  es la comparación que se hace entre la media de los datos del biofiltro y la media de los datos del sistema combinado, biofiltro-humedal. Los símbolos II=III, expresan la igualdad estadística entre la media del biofiltro individual y la media de los sistemas combinados. La expresión “I $\neq$ II” enuncia que entre la media del humedal individual y la del biofiltro individual existe una diferencia significativa.

**Simbología para la Tabla anterior**

|                  |   |  |
|------------------|---|--|
| M I              | Módulo I<br>Agua de semiblanqueo + agua residual municipal  |  |
| MII              | Módulo II<br>Baño de teñido + agua residual municipal   |  |
| M III            | Módulo III<br>Mezcla de las dos anteriores  |  |
| $\mu_1$          | I   | Media del sistema 1: humedal                         |
| $\mu_2$          | II  | Media del sistema 2: biofiltro                       |
| $\mu_3$          | III   | Media del sistema 3: combinación biofiltro - humedal |
| $\mu_1 - \mu_2$  |   |  |
| $\mu_1 - \mu_3$  | Pares de medias que se forman al compararlas entre sí   |  |
| $\mu_2 - \mu_3$  |   |  |
| $I \neq II$      | Existe diferencia significativa entre la media del humedal ( $\mu_1$ ) y la del biofiltro ( $\mu_2$ )                     |  |
| $II = III$       | No existe diferencia significativa entre la media del biofiltro ( $\mu_2$ ) y la del biofiltro-humedal ( $\mu_3$ )        |  |
| Significativa    | La diferencia entre los tres sistemas es significativa, por lo que hay un sistema que funciona mejor                      |  |
| No significativa | La diferencia entre los tres sistemas es no significativa, por lo que los tres sistemas funcionan estadísticamente igual. |  |

A continuación se presentan los ANDEVA, la aplicación del método de Duncan y las gráficas de medias para cada factor.

### Módulo I

Variable de respuesta: **DQO**

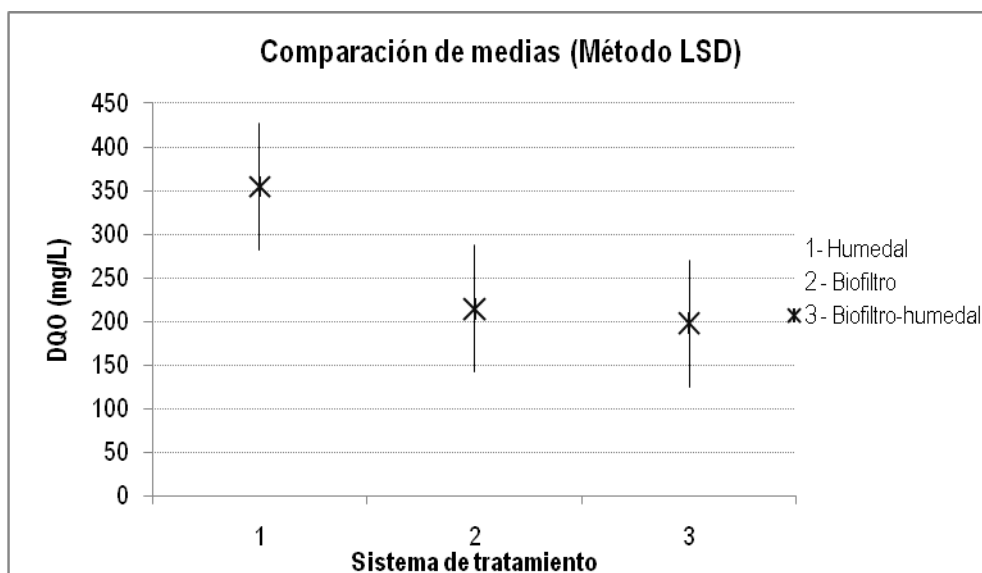
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>Fo</i> | <i>Fcalc</i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Tratamientos | 95454.97  | 2.00      | 47727.48  | 105.60    | 5.00         |
| Error        | 25762.44  | 57.00     | 451.97    |           |              |
| Total        | 121217.41 | 59.00     |           |           |              |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias                | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ ) | Decisión            |
|------------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| $\mu_1-\mu_3$ 166.80 - 8.67  | 158.13              | > 17.98         | $R_3$ Significativa |
| $\mu_1-\mu_2$ 166.80 - 50.03 | 116.77              | > 18.75         | $R_2$ Significativa |
| $\mu_2-\mu_3$ 50.03 - 8.67   | 41.36               | > 18.75         | $R_2$ Significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias                | Diferencia muestral | LSD     | Decisión      |
|------------------------------|---------------------|---------|---------------|
| $\mu_1-\mu_3$ 166.80 - 8.67  | 158.13              | > 22.02 | Significativa |
| $\mu_1-\mu_2$ 166.80 - 50.03 | 116.77              | > 22.02 | Significativa |
| $\mu_2-\mu_3$ 50.03 - 8.67   | 41.36               | > 22.02 | Significativa |



## Módulo II

Variable de respuesta: **DQO**

### ANDEVA

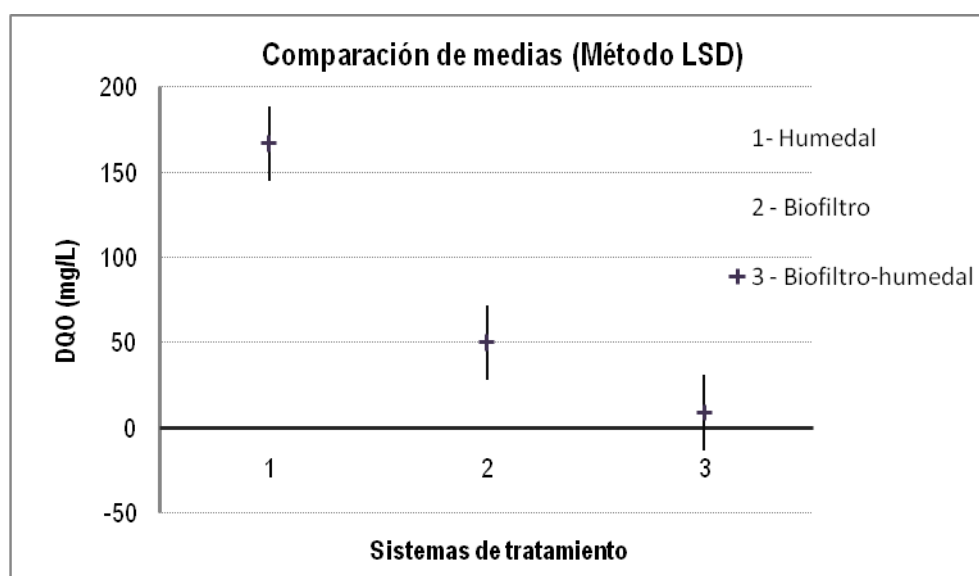
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|
| Tratamientos | 386354.90 | 2.00      | 193177.45 | 29.78                | 4.91                 |
| Error        | 486519.46 | 75.00     | 6486.93   |                      |                      |
| Total        | 872874.36 | 77.00     |           |                      |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias                   | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ )                |
|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ 354.54 - 197.43 | 157.11              | > 63.36 $R_3$ Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_2$ 354.54 - 214.52 | 140.02              | > 61.56 $R_2$ Significativa    |
| $\mu_2 - \mu_3$ 214.52 - 197.43 | 17.09               | < 61.56 $R_2$ No significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias                   | Diferencia muestral | LSD     | Decisión         |
|---------------------------------|---------------------|---------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ 354.54 - 197.43 | 157.11              | > 72.32 | Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_2$ 354.54 - 214.52 | 140.02              | > 72.32 | Significativa    |
| $\mu_2 - \mu_3$ 214.52 - 197.43 | 17.09               | < 72.32 | No significativa |



### Módulo III

Variable de respuesta: **DQO**

### ANDEVA

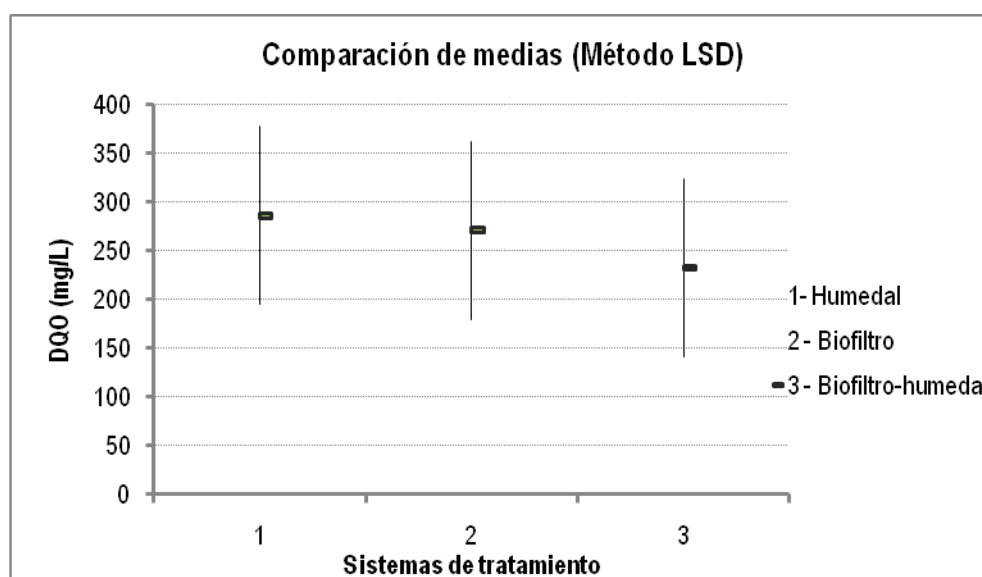
| <i>FV</i>    | <i>SC</i>  | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>Fo</i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| Tratamientos | 155885.52  | 2.00      | 77942.76  | 6.85      | 4.87                 |
| Error        | 944342.43  | 83.00     | 11377.62  |           |                      |
| Total        | 1100227.95 | 85.00     |           |           |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias   |        |   | Diferencia muestral | Rango ( <i>R<sub>p</sub></i> ) | Decisión                       |
|-----------------|--------|---|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ | 286.13 | - | 232.48              | 53.65                          | < 79.90 $R_3$ No significativa |
| $\mu_1 - \mu_2$ | 286.13 | - | 270.92              | 15.21                          | < 77.58 $R_2$ No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 270.92 | - | 232.48              | 38.44                          | < 77.58 $R_2$ No significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias   |        |   | Diferencia muestral | LSD   | Decisión                 |
|-----------------|--------|---|---------------------|-------|--------------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ | 286.13 | - | 270.92              | 15.21 | < 91.20 No significativa |
| $\mu_1 - \mu_2$ | 286.13 | - | 232.48              | 53.65 | < 91.20 No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 270.92 | - | 232.48              | 38.44 | < 91.20 No significativa |



## Módulo II

Variable de respuesta: **Concentración de colorante Negro Ciba R**

### ANDEVA para la concentración de color Negro R en los sistemas del módulo II

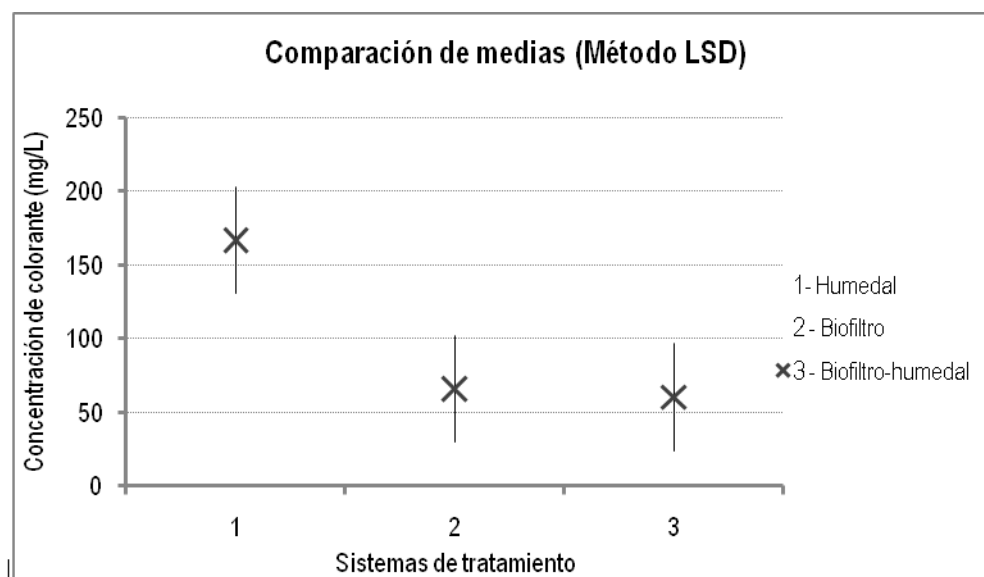
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|
| Tratamientos | 116267.33 | 2.00      | 58133.67  | 48.80                | 5.02                 |
| Error        | 65512.96  | 55.00     | 1191.14   |                      |                      |
| Total        | 181780.30 | 57.00     |           |                      |                      |

### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias   | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ ) | Decisión                  |
|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ | 166.99 - 60.16      | 106.83 > 30.94  | $R_3$ Significativa       |
| $\mu_1 - \mu_2$ | 166.99 - 66.08      | 100.91 > 29.67  | $R_2$ Significativa<br>No |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 66.08 - 60.16       | 5.91 < 29.67    | $R_2$ significativa       |

### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias   | Diferencia muestral | LSD            | Decisión            |
|-----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 166.99 - 66.08      | 100.91 > 36.33 | Significativa       |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 166.99 - 60.16      | 106.83 > 36.33 | Significativa<br>No |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 66.08 - 60.16       | 5.91 < 36.33   | significativa       |



### Módulo III

Variable de respuesta: **Concentración de colorante Negro Ciba R**

#### ANDEVA para la concentración de color Negro R en los sistemas del módulo III

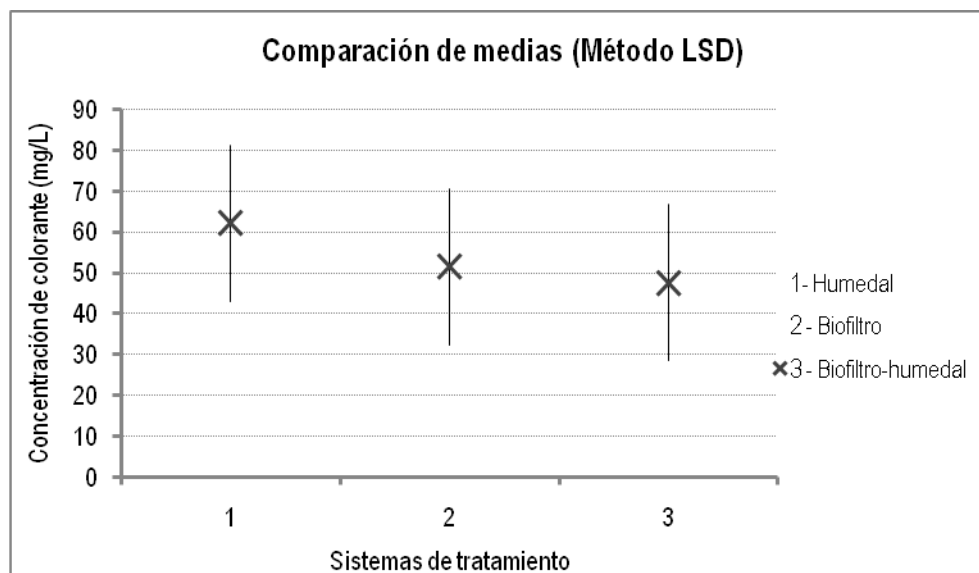
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|
| Tratamientos | 3484.13   | 2.00      | 1742.07   | 5.94                 | 5.07                 |
| Error        | 14376.70  | 49.00     | 293.40    |                      |                      |
| Total        | 17860.83  | 51.00     |           |                      |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias                 | Diferencia muestral | Rango ( <i>R<sub>p</sub></i> ) | Decisión         |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ 62.20 - 47.53 | 14.67               | < 16.31                        | No significativa |
| $\mu_1 - \mu_2$ 62.20 - 51.52 | 10.68               | < 15.63                        | No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ 51.52 - 47.53 | 3.99                | < 15.63                        | No significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias                 | Diferencia muestral | LSD     | Decisión         |
|-------------------------------|---------------------|---------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ 62.20 - 51.52 | 10.68               | < 19.13 | No significativa |
| $\mu_1 - \mu_3$ 62.20 - 47.53 | 14.67               | < 19.13 | No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ 51.52 - 47.53 | 3.99                | < 19.13 | No significativa |



## Módulo II

Variable de respuesta: **Concentración de colorante Negro Ciba G**

### ANDEVA para la concentración de color Negro G en los sistemas del módulo II

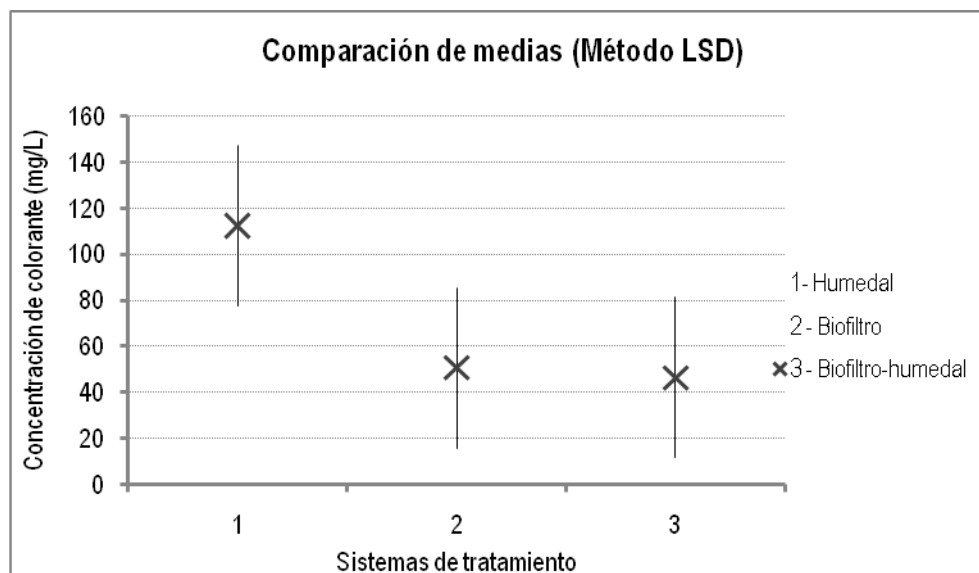
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|
| Tratamientos | 54398.72  | 2.00      | 27199.36  | 23.87                | 5.00                 |
| Error        | 64944.47  | 57.00     | 1139.38   |                      |                      |
| Total        | 119343.19 | 59.00     |           |                      |                      |

### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias   | Diferencia muestral | Rango ( <i>R<sub>p</sub></i> ) | Decisión            |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ | 112.29 - 46.36      | 65.93 > 28.45                  | $R_3$ Significativa |
| $\mu_1 - \mu_2$ | 112.29 - 50.70      | 61.59 > 29.67                  | $R_2$ Significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 50.70 - 46.36       | 4.34 < 29.67                   | No significativa    |

### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias   | Diferencia muestral | LSD           | Decisión         |
|-----------------|---------------------|---------------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 112.29 - 50.70      | 61.59 > 34.85 | Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 112.29 - 46.36      | 65.93 > 34.85 | Significativa    |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 50.70 - 46.36       | 4.34 < 34.85  | No significativa |





### Módulo III

Variable de respuesta: **Concentración de colorante Negro Ciba G**

#### ANDEVA para la concentración de color Negro G en los sistemas del módulo III

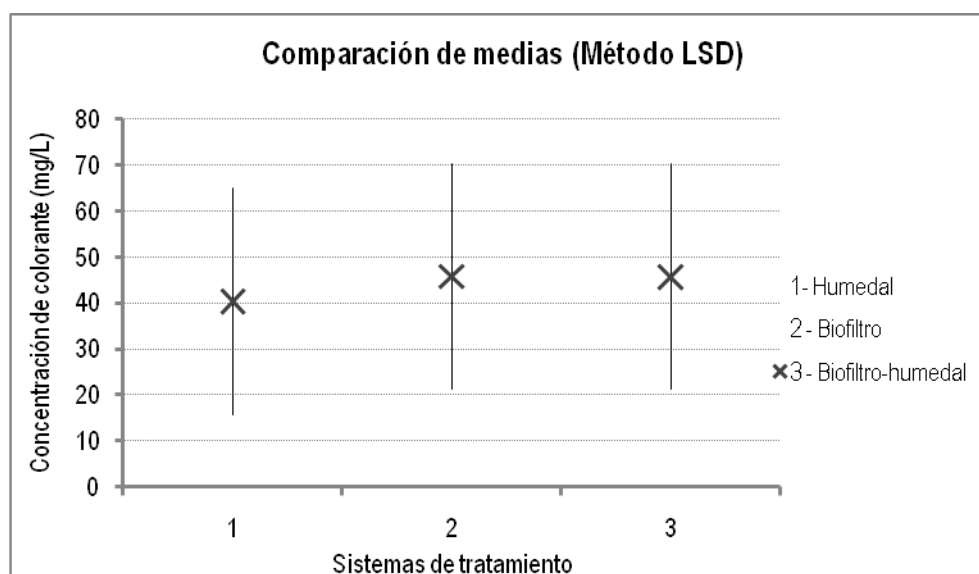
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|
| Tratamientos | 1826.95   | 2.00      | 913.47    | 1.73                 | 5.03                 |
| Error        | 28506.25  | 54.00     | 527.89    |                      |                      |
| Total        | 30333.20  | 56.00     |           |                      |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias                 | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ ) | Decisión         |
|-------------------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| $\mu_2 - \mu_1$ 45.74 - 40.31 | 5.42                | < 20.83         | No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ 45.74 - 45.62 | 0.12                | < 17.09         | No significativa |
| $\mu_3 - \mu_1$ 45.62 - 40.31 | 5.30                | < 17.09         | No significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias                 | Diferencia muestral | LSD     | Decisión         |
|-------------------------------|---------------------|---------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ 40.31 - 45.74 | 5.42                | < 24.52 | No significativa |
| $\mu_1 - \mu_3$ 40.31 - 45.62 | 5.30                | < 24.52 | No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ 45.74 - 45.62 | 0.12                | < 24.52 | No significativa |



## Módulo II

Variable de respuesta: **Concentración de colorante Amarillo Ciba S3R**

**ANDEVA para la concentración de color Amarillo en los sistemas del módulo II**

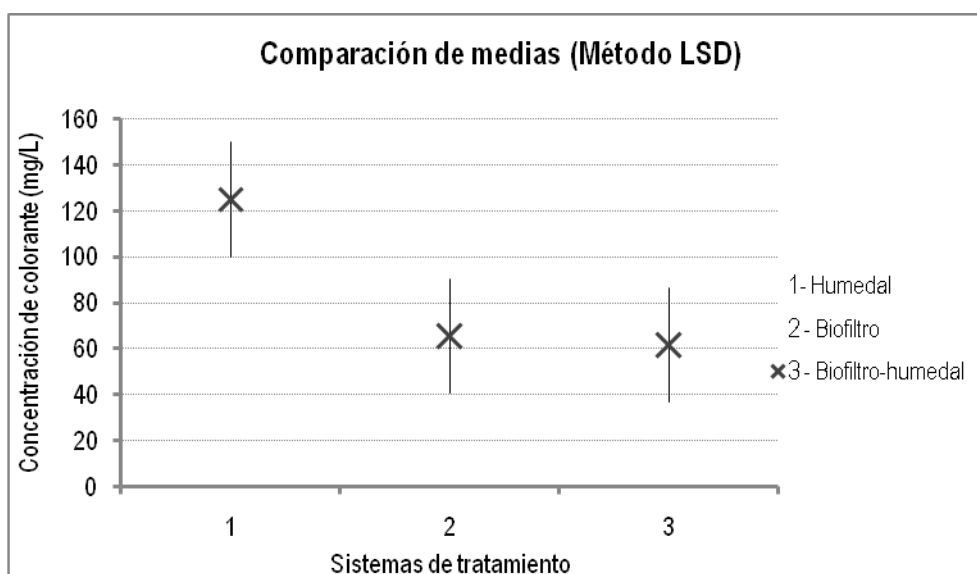
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>Fo</i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| Tratamientos | 50360.59  | 2.00      | 25180.29  | 43.21     | 5.00                 |
| Error        | 33219.66  | 57.00     | 582.80    |           |                      |
| Total        | 83580.25  | 59.00     |           |           |                      |

### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias   | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ ) | Decisión               |
|-----------------|---------------------|-----------------|------------------------|
| $\mu_1 - \mu_3$ | 124.89 - 61.50      | 63.39 > 20.35   | $R_3$ Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_2$ | 124.89 - 65.56      | 59.33 > 21.22   | $R_2$ Significativa    |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 65.56 - 61.50       | 4.06 < 21.22    | $R_2$ No significativa |

### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias   | Diferencia muestral | LSD           | Decisión         |
|-----------------|---------------------|---------------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 124.89 - 65.56      | 59.33 > 24.92 | Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 124.89 - 61.50      | 63.39 > 24.92 | Significativa    |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 65.56 - 61.50       | 4.06 < 24.92  | No significativa |



### Módulo III

Variable de respuesta: **Concentración de colorante Amarillo Ciba S3R**

#### ANDEVA para la concentración de color amarillo en los sistemas del módulo III

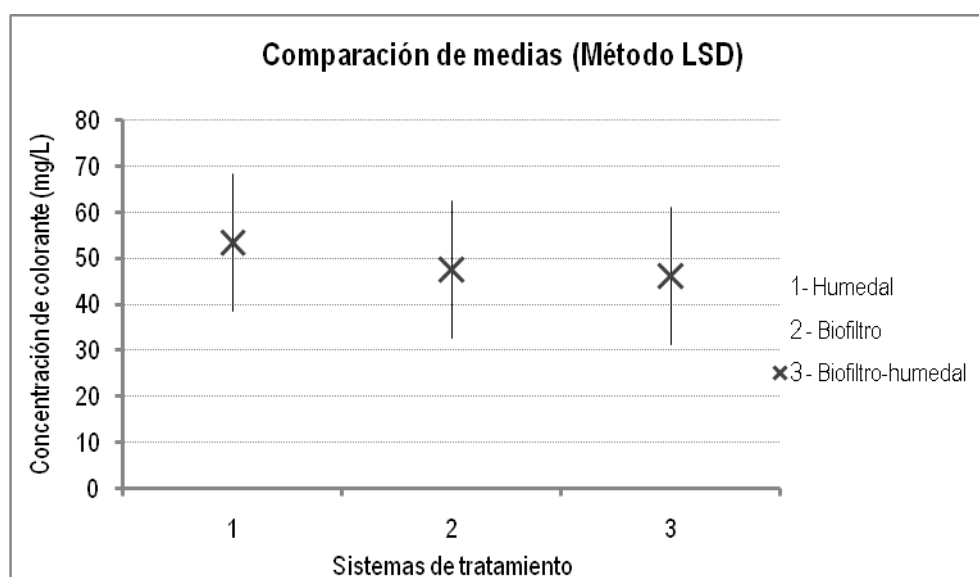
| <i>FV</i>    | <i>SC</i> | <i>GL</i> | <i>CM</i> | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|
| Tratamientos | 603.73    | 2.00      | 301.87    | 1.13                 | 5.00                 |
| Error        | 15199.95  | 57.00     | 266.67    |                      |                      |
| Total        | 15803.68  | 59.00     |           |                      |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias               | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ ) | Decisión         |
|-----------------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| $\mu_1-\mu_3$ 53.39 - 46.06 | 7.34                | < 13.76         | No significativa |
| $\mu_1-\mu_2$ 53.39 - 47.51 | 5.88                | < 14.35         | No significativa |
| $\mu_2-\mu_3$ 47.51 - 46.06 | 1.46                | < 14.35         | No significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias               | Diferencia muestral | LSD     | Decisión         |
|-----------------------------|---------------------|---------|------------------|
| $\mu_1-\mu_2$ 53.39 - 47.51 | 5.88                | < 14.87 | No significativa |
| $\mu_1-\mu_3$ 53.39 - 46.06 | 7.34                | < 14.87 | No significativa |
| $\mu_2-\mu_3$ 47.51 - 46.06 | 1.46                | < 14.87 | No significativa |



## Módulo II

Variable de respuesta: **Color aparente medido en unidades platino cobalto (UPT/Co)**

### ANDEVA para color aparente en los sistemas del módulo II

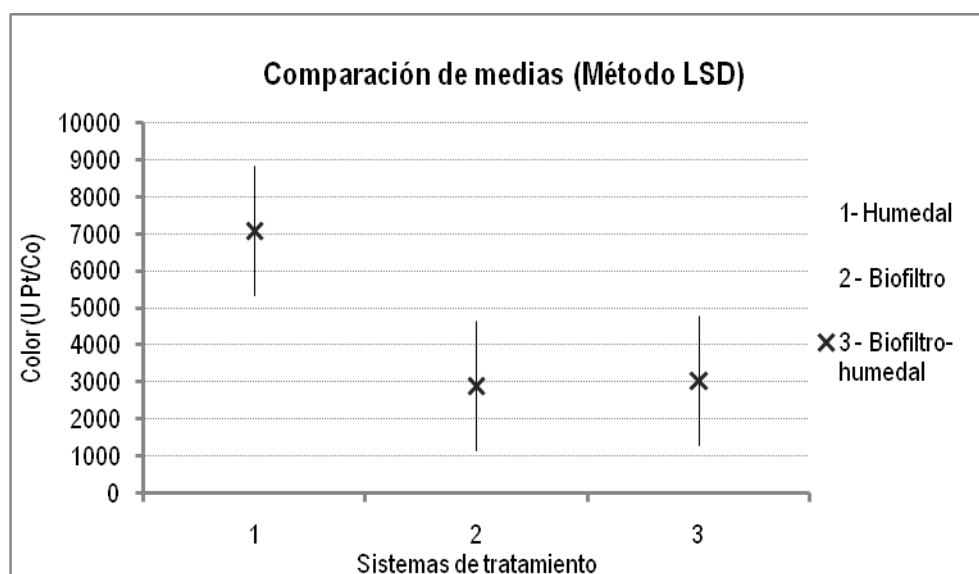
| <i>FV</i>    | <i>SC</i>    | <i>GL</i> | <i>CM</i>    | <i>F<sub>0</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|--------------|-----------|--------------|----------------------|----------------------|
| Tratamientos | 404745069.91 | 2.00      | 202372534.95 | 38.07                | 4.81                 |
| Error        | 558228149.31 | 105.00    | 5316458.56   |                      |                      |
| Total        | 962973219.21 | 107.00    |              |                      |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias   | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ )   | Decisión               |
|-----------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 7073.89 - 2900.83   | 4173.06 > 1483.36 | $R_3$ Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 7073.89 - 3037.08   | 4036.81 > 1425.72 | $R_2$ Significativa    |
| $\mu_3 - \mu_2$ | 3037.08 - 2900.83   | 136.25 < 1425.72  | $R_2$ No significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias   | Diferencia muestral | LSD               | Decisión         |
|-----------------|---------------------|-------------------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 7073.89 - 2900.83   | 4173.06 > 1747.06 | Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 7073.89 - 3037.08   | 4036.81 > 1747.06 | Significativa    |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 2900.83 - 3037.08   | 136.25 < 1747.06  | No significativa |



### Módulo III

Variable de respuesta: **Color aparente medido en unidades platino cobalto (UPT/Co)**

#### ANDEVA para la concentración de color Negro R en los sistemas del módulo II

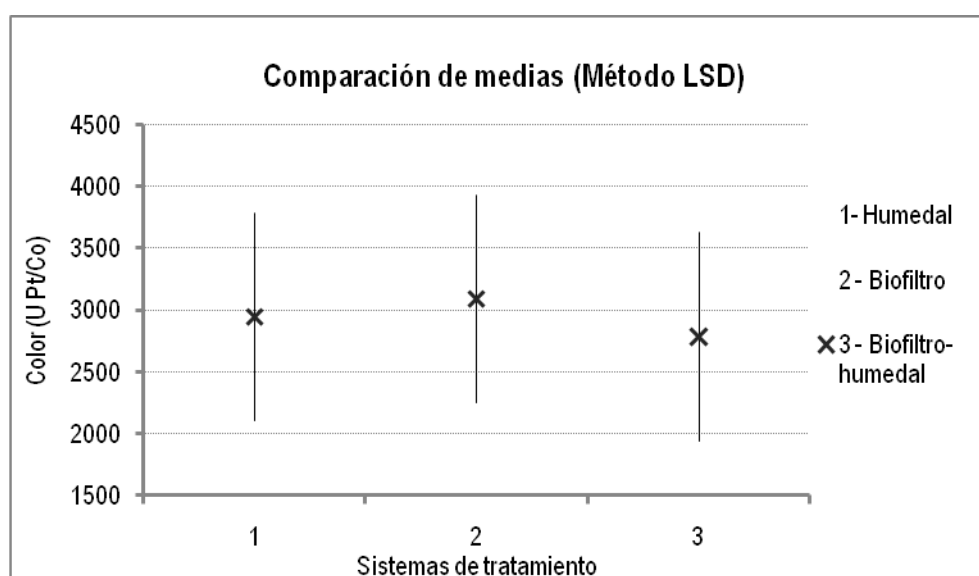
| <i>FV</i>           | <i>SC</i>    | <i>GL</i> | <i>CM</i>  | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|---------------------|--------------|-----------|------------|----------------------|----------------------|
| <b>Tratamientos</b> | 18872738.27  | 2.00      | 9436369.14 | 8.07                 | 4.82                 |
| <b>Error</b>        | 116895183.09 | 100.00    | 1168951.83 |                      |                      |
| <b>Total</b>        | 135767921.36 | 102.00    |            |                      |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias   | Diferencia muestral | Rango ( <i>R<sub>p</sub></i> ) | Decisión         |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|------------------|
| $\mu_2 - \mu_3$ | 3088.33 - 2784.19   | 304.14 < 714.01                | No significativa |
| $\mu_2 - \mu_1$ | 3088.33 - 2942.64   | 145.69 < 686.27                | No significativa |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 2942.64 - 2784.19   | 158.45 < 686.27                | No significativa |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias   | Diferencia muestral | LSD             | Decisión         |
|-----------------|---------------------|-----------------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 2942.64 - 3088.33   | 145.69 < 841.34 | No significativa |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 2942.64 - 2784.19   | 158.45 < 841.34 | No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 3088.33 - 2784.19   | 304.14 < 841.34 | No significativa |



## Módulo II

Variable de respuesta: **Color verdadero medido en unidades platino cobalto (UPT/Co)**  
**ANDEVA para la concentración de color Negro R en los sistemas del módulo II**

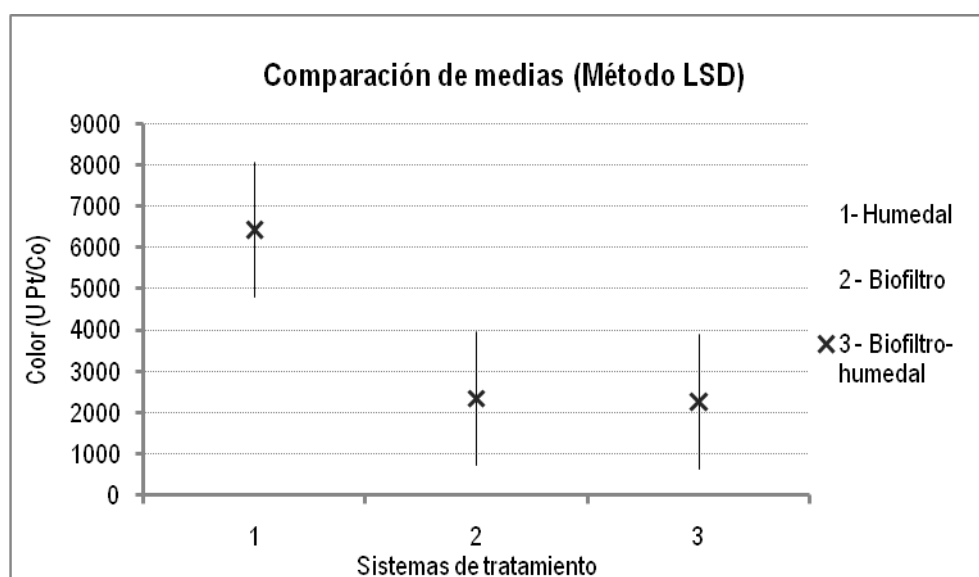
| <i>FV</i>    | <i>SC</i>    | <i>GL</i> | <i>CM</i>    | <i>Fo</i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|--------------|--------------|-----------|--------------|-----------|----------------------|
| Tratamientos | 400411457.30 | 2.00      | 200205728.65 | 43.87     | 4.81                 |
| Error        | 474585856.94 | 104.00    | 4563325.55   |           |                      |
| Total        | 874997314.24 | 106.00    |              |           |                      |

### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias   | Diferencia muestral | Rango ( $R_p$ )   | Decisión            |
|-----------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 6427.50 - 2268.31   | 4159.19 > 1380.81 | $R_3$ Significativa |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 6427.50 - 2346.03   | 4081.47 > 1327.16 | $R_2$ Significativa |
| $\mu_3 - \mu_2$ | 2346.03 - 2268.31   | 77.72 < 1327.16   | No significativa    |

### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias   | Diferencia muestral | LSD               | Decisión         |
|-----------------|---------------------|-------------------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ | 6427.50 - 2346.03   | 4081.47 > 1626.44 | Significativa    |
| $\mu_1 - \mu_3$ | 6427.50 - 2268.31   | 4159.19 > 1626.44 | Significativa    |
| $\mu_2 - \mu_3$ | 2346.03 - 2268.31   | 77.72 < 1626.44   | No significativa |



### Módulo III

Variable de respuesta: **Color verdadero medido en unidades platino cobalto (UPt/Co)**

#### ANDEVA para la concentración de color Negro R en los sistemas del módulo II

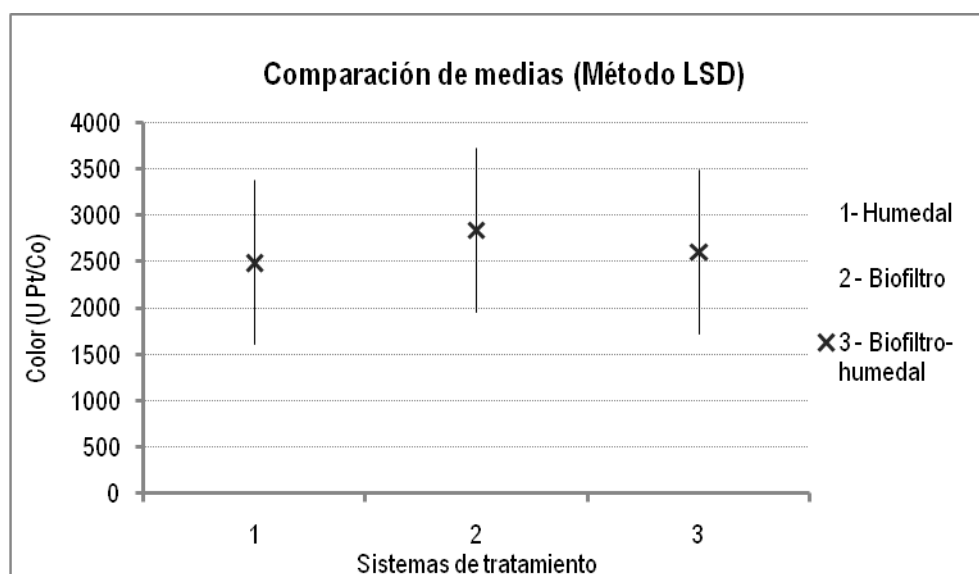
| <i>FV</i>           | <i>SC</i>    | <i>GL</i> | <i>CM</i>  | <i>F<sub>o</sub></i> | <i>F<sub>T</sub></i> |
|---------------------|--------------|-----------|------------|----------------------|----------------------|
| <b>Tratamientos</b> | 2302496.97   | 2.00      | 1151248.49 | 0.91                 | 4.83                 |
| <b>Error</b>        | 124472744.12 | 98.00     | 1270130.04 |                      |                      |
| <b>Total</b>        | 126775241.09 | 100.00    |            |                      |                      |

#### Comparación de medias por el método Duncan

| Par de medias                     | Diferencia muestral | Rango ( <i>R<sub>p</sub></i> ) | Decisión                  |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------|
| $\mu_2 - \mu_1$ 2836.67 - 2486.13 | 350.54              | < 751.75                       | $R_3$ significativa<br>No |
| $\mu_2 - \mu_3$ 2836.67 - 2600.88 | 235.78              | < 722.46                       | $R_2$ significativa<br>No |
| $\mu_3 - \mu_1$ 2600.88 - 2486.13 | 114.75              | < 722.46                       | $R_2$ significativa       |

#### Comparación de medias por el método LSD (Diferencia mínima significativa)

| Par de medias                     | Diferencia muestral | LSD      | Decisión         |
|-----------------------------------|---------------------|----------|------------------|
| $\mu_1 - \mu_2$ 2486.13 - 2836.67 | 350.54              | < 885.53 | No significativa |
| $\mu_1 - \mu_3$ 2486.13 - 2600.88 | 114.75              | < 885.53 | No significativa |
| $\mu_2 - \mu_3$ 2836.67 - 2600.88 | 235.78              | < 885.53 | No significativa |



---

## BIBLIOGRAFÍA

---

APHA-AWWA-WPCF (1992), Métodos normalizados para el análisis de Aguas Potables y Residuales, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España.

Bishop, P. (1996), The biodegradation of textiles dyes using biofilm treatment systems; en: Biodegradación *de* compuestos orgánicos industriales, Kuppusamy I. y Briones R. (Eds), UNAM, Instituto de Ingeniería, México, D.F., 1-10.

Bishop, P.L., Jiang, H. (1994), Aerobic biodegradation of azo dyes in biofilms, *Water Science and Technology*, **29**(10/11), 525–530.

Bryes, J.D., Characklis, W.G. (1990), Biofilms in water and wastewater treatment. In: Biofilms, eds. Characklis W.G., Marshall K.C., John Wiley, New York NY, EEUU, 671-696 pp..

Buelna, G., Dubé, R., Turgeon, N. (2008), Pig manure treatment by organic bed filtration, *Desalination*, **231**, 297-304.

Bulc, T.G., Ojstršek, A. (2008), The use of constructed wetlands for dye-rich textile wastewater treatment, *Journal of Hazardous Materials*, **155**, 76-82.

Carliell (1995), *Op. cit.* Hao O. J., Kim H. y Chiang P-Ch. (2000), *Decolorization of Wastewater*; *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **30**(4), 449–505.

Carliell, C. M., Barclay, S. J., Naidoo, N., Buckley, C. A., Mulholland, D. A., Senior, E. (1995), Microbial decolorization of a reactive azo dye under anaerobic conditions. *Water SA*, **21**(1), 61–69.



Cervantes, A. (2009), Sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales para viviendas unifamiliares, Tesis de Maestría en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, *Facultad de Ingeniería, UNAM*, México DF, México, 100pp.

Comisión Ambiental Metropolitana (1999), *Manual de minimización, tratamiento y disposición "Concepto de manejo de residuos industriales para el giro textil"*, México D.F., México, 86pp.

Corbman, B.P., Potter, M.D. (1975), *Textiles: fiber to fabric*, 5a. Ed., McGraw-Hill, New York, EEUU, 568pp.

Cruz, A., Buitrón, G. (2000), Biotransformation of disperse blue 79 by an anaerobic sequencing batch biofilter, *Water Science and Technology*, **42**(5-6), 317-320.

Davies, L.C., Vacas, A., Novais J.M., Freire, F.G., Martins-Dias, S. (2007), Vertical flow constructed wetland for textile effluent treatment; *Wat. Sci. Technol.*, **55**(7), 127-134.

Dos Santos, A., Cervantes, F., Van Lier, J. (2007), Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology, *Bioresource Technology*, **98**, 2369-2385.

Durán-de-Bazúa, C., Luna-Pabello, V.M. (1998), *Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales*. Patente Núm 9810668. Solicitud de registro: Noviembre de 1998. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Dirección Divisional de Patentes. México D.F. México.

EPA (1988), *Design Manual Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*, Office of Research and Development Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH, EEUU.

EPA (1996), *Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry*, Office of Research and Development, Washington D.C., EEUU.

EPA (1997), *Profile of the Textile Industry*; Office of Compliance Sector Notebook Project, EPA/310-R-97-009, Washington, D.C., EEUU, 136pp.

EPA (2000a), *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial*, EPA832-F-00-024, Washington, D.C., EEUU, 10pp.

EPA (2000b), *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo sub-superficial*, EPA832-F-00-023, Washington, D.C., EEUU, 13pp.

Field, J.A., Stams, A.J.M., Kato, M., Scharaa, G. (1995), Enhanced biodegradation of aromatic pollutants in cocultures of anaerobic and aerobic bacterial consortia, *J. Microbiol. Serol.* **67**,47-77.

Gahr, F., Hermanutz, F., and Oppermann, W. (1994), An important technique to comply with new German laws for textile wastewater treatment; *Wat. Sci. Technol.*, **30**(3), 255–263.

García, L. (2007), Decoloración fúngica de efluentes industriales con colorantes azo en sistemas de biofiltración con diferentes empaques orgánicos, Tesis de Maestría en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, *Facultad de Ingeniería, UNAM, México DF, México*, 149pp.

Garzón-Zuñiga, M.A. (2002), La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México*.

Guido-Zárate, A. (2006), Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial, Tesis de Maestría en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Química, UNAM, México DF, 186 pp.

Gutiérrez P.H., De La Vara S. R. (2008) *Análisis y diseño de experimentos*, 2<sup>a</sup>. Ed, McGraw-Hill Interamericana, México D.F., México, 545 pp.

Hao, O. J., Kim, H., Chiang, P. (2000), Decolorization of Wastewater, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **30**(4), 449–505.

Henze, M., Harremöes, J. P., Cour, J., Arvin, E. (1995) *Wastewater Treatment - Biological and Chemical Processes*. Springer-Verlag, Berlin, Alemania.

Hernández, Y. (2009), Tratamiento de aguas residuales de la industria de azocolorantes por medio de un proceso biológico combinado, Tesis de Maestría en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, *Facultad de Ingeniería, UNAM, México DF, México*, 185pp.

Hernández, Y., Moeller G.E. (2008), Tratamiento de aguas residuales de la industria de azocolorantes por medio de un proceso biológico combinado, en *XXXI Congreso interamericano AIDIS*, Santiago Chile, Chile, 185pp.

Kadlec, R.H., Knight, R.L. (1996), *Treatment Wetlands*, Ed. Lewis Publishers, Boca Ratón, Florida, 893pp.

Kalyuzhny, S., Skylar, V. (1999), Biomineralization of azo dyes and their breakdown products in anaerobic-aerobic hybrid and UASB reactors, *Wat. Sci. Tech.*, **41**(12), 23-30.

Khelifi, E., Gannoun, H., Touhami, Y., Bouallagui H., Hamdi M., (2008), Aerobic decolourization of the indigo dye-containing textile wastewater using continuous combined bioreactors, *J. Hazard. Mater.* **152**, 683-689.

Kim, T.H., Park, C., Yang, J., Kim, S., (2004), Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation. *J. Hazardous Materials* **112**, 95–103.

Kirk-Othmer (1993), *Encyclopedia of Chemical Technology*, cuarta edición, vol. 10, Wiley, New York, EEUU.

Knackmuss, H.-J. (1996), Basic knowledge and perspectives of bioelimination of xenobiotic compounds, *J. Biotechnol.* **51**, 287–295.

Kuppusamy, I. (1995), Impacto ambiental de la industria textil en México: Avances en la biodegradación anaerobia y precipitación de colorantes tipo azo. En *Segundo Minisimposium Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Aguas y Suelos*. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre 17, 144-158.

Lazarova, V., Manem, J. (1995); Biofilm characterization and activity analysis in water and wastewater treatment, *Water Research*; **29** (10), 2227 – 2245.

Lourenco, N.D., Novais, J.M., Pinheiro, H.M. (2000); Reactive textile dye colour removal in a sequencing batch reactor, *Water Science and Technology*, **42**, 321–328.

Mansilla, H.D., Lizama, C., Freer, J., Baeza, J. (2002) Optimized photodegradation of Reactive Blue 19 on TiO<sub>2</sub> and ZnO suspensions, *Catalysis Today*, **76**, 235–246.

Mendoza, G. (2010), Decoloración de un efluente de la industria textil mediante el proceso foto-fenton acoplado a un sistema de biofiltración, Tesis de Maestría en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, *Facultad de Ingeniería, UNAM*, México, DF, México, 77pp.

Michaels, G., Lewis, D. (1986), Microbial transformation rates of azo and triphenylmethane dyes, *Environ. Toxicol Chem.* **5**, 161-166.

Mbuligwe, S.E. (2005), Comparative treatment of dye-rich wastewater in engineered wetland systems (EWSs) vegetated with different plants, *Water Research*, **39**, 271-289.

Moeller, G., Garzón, M. (2006), Decoloración y reducción de toxicidad de efluentes de la industria química de colorantes y pigmentos. Informe primera etapa, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (CONACYT-CONAGUA)*, Jiutepec, Morelos, México.

Moeller, G., Garzón, M. (2009), Sistema combinado de biofiltración-humedal para el tratamiento de aguas residuales de viviendas unifamiliares, patente MX/a/2009/010834, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, Jiutepec, Morelos, México.

Moeller, G., Garzón, M., Tomasini A., Mijaylova, P., Chacón, J., Gómez, A., Sandoval, A. (2007), Decoloración y reducción de toxicidad de efluentes de la industria química de colorantes y pigmentos. Informe final, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (proyecto CONACYT-CONAGUA)*, Jiutepec, Morelos, México.

Ong, S., Uchiyama, K., Inadama, D., Yamagiwa, K.. (2009), Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland, *Journal of Hazardous Materials*, **165**, 696-703.

O'Neill, C., Hawkes, F. R., Esteves, S. R. R., Hawkes, D. L., Wilcox, S. J. (1999), Anaerobic and aerobic treatment of a simulated textile effluent. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **74**, 993-999.

Pagga, U., Brown, D. (1986), The degradation of dyestuffs: Part II – Behavior of dyestuffs in aerobic biodegradation tests, *Chemosphere*, **15**, 479-491.

Poots, V. J., McKay, G., Healy, J. J. (1975), The removal of acid dye from effluent using natural adsorbents: II Peat, *Water Research*, **10**, 1061-1066.

Quezada, M., Linares, I., Buitrón, G. (2000), Use of a sequencing batch biofilter for degradation of azo dyes (acids and bases), *Water Science and Technology*, **42** (5-6), 329-336.

Rajaguru, P., Kalaiselvi, K., Palanivel, M., Subburam, V. (2000), Biodegradation of azo dyes in a sequential anaerobic-aerobic system, *Applied Microbiology Biotechnology*, **54**, 268-273.

Razo-Flores, E. (1997), Biotransformation and biodegradation of N-substituted aromatics in methanogenic granular sludges, tesis de doctorado, *Wageningen Agricultural University*, Wageningen, Países Bajos.

Riu, J., Schönsee, I., Barcelo, D. (1998), Determination of sulfonated azo dyes in groundwater and industrial effluents by automated solid-phase extraction followed by capillary electrophoresis/ mass spectrometry, *J. Mass Spectro* **33**, 653-63.

Rodríguez-Monroy, J., Durán de Bazúa, C. (2006), Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco, *Tecnología, Ciencia, Educación, Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos*, **21**(1), 25-33.

Romero-Rojas, J.A. (2004), *Tratamiento de aguas residuales*, 3ª. Ed., Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia, 1248 pp.

Ruiz-López, V. (2009), Remoción de cadmio y zinc de aguas residuales de una industria minera mediante reactores biológicos que simulan un humedal artificial, Tesis de Maestría en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Química, UNAM, México DF, 186 pp.

Şen, S., Demirer, G.N. (2003), Anaerobic treatment of real textile wastewater with fluidized bed reactor (FBR), *Water Research*, **37**,1868-1878.

Sundaravadivel, M., Vigneswaran, S. (2001), Constructed wetlands for wastewater treatment, *Environmental Science and Technology*, **31**(4), 351-409.

Stephen, J. A., McKay G., Khader, K. Y. (1988), Multi-component sorption isotherms of basic dyes onto peat, *Environmental pollution*, **52**, 39-55.

Tantak, N.P., Chaudhari, S. (2006), Degradation of azo dyes by sequential Fenton's oxidation and aerobic biological treatment , *Journal of Hazardous Materials*, **136**(3), 698-70.

Vijaya, P.P., Sandhya, S. (2003), Decolourization and complete degradation of methyl red by mixed culture of Bacillus sp. and Pseudomonas stutzeri, *Environmentalist*, **23**, 145–149.

Van der Zee, F.P., Villaverde, S. (2005), Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes-A short review of bioreactor studies, *Water Research*, **39**, 1425-1440.

Verma, S.P. (2005) *Estadística básica para el manejo de datos experimentales: Aplicación en la geoquímica (Geoquimiometría)*, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., 186 pp.

Viraraghavan, T., Ayyaswami, A. (1987), Use of peat in water pollution control: A review, *Civ. Eng.* **14**, 230-233.

Weber, E., Wolfe, L. (1987), Kinetics studies of reduction of aromatic azo compounds in anaerobic sediment/water systems, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **6**, 911-920.

World Bank Group (2007), *Pollution Prevention and Abatement Handbook*, Environment Department, Washington D.C., EEUU

Wu, H., Wang, S., Kong, H., Liu, T., Xia, M. (2006), Performance of combined process of anoxic baffled reactor-biological contact oxidation treating printing and dyeing wastewater, *Bioresource Technology*, **98**, 1501-1504.

Zhang, C., Fu, C., Bishop, L., Kupferle, M., FitzGerald, S., Jiang, H., Harmer, C., (1995), Transport and biodegradation of toxic organics in biofilms, *Journal of Hazardous Materials*, **41**, 267–285.