



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Programa de Posgrado

Tesis

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES QUE CONTIENEN COLORANTES
UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL, MEDIANTE UN PROCESO
COMBINADO DE OXIDACIÓN AVANZADA Y UN PROCESO
BIOLÓGICO

que para obtener el grado de
Maestría en Ciencias y Tecnología del Agua
(Sistemas Ambientales)

Presenta
Diego Francisco Cuevas Aragón

Tutor: Dr. Marco Antonio Garzón Zúñiga

Jiutepec, Morelos

2009



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Programa de Posgrado

Tesis

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES QUE CONTIENEN COLORANTES
UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL, MEDIANTE UN PROCESO
COMBINADO DE OXIDACIÓN AVANZADA Y UN PROCESO BIOLÓGICO**

que para obtener el grado de
Maestría en Ciencias y Tecnología del Agua
(Sistemas Ambientales)

presenta
Diego Francisco Cuevas Aragón

Tutor: Dr. Marco Antonio Garzón Zúñiga

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES QUE CONTIENEN COLORANTES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL, MEDIANTE UN PROCESO COMBINADO DE OXIDACIÓN AVANZADA Y UN PROCESO BIOLÓGICO", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

DIEGO FRANCISCO CUEVAS ARAGÓN

Jutepeca, Morelos, a 7 de Septiembre de 2009

Lugar y fecha



A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right, positioned above a solid horizontal line.

Firma

*"Basta un poco de espíritu aventurero
para estar siempre satisfechos,
pues en esta vida, gracias a Dios,
nada sucede como deseábamos,
como suponíamos,
ni como teníamos previsto."*

Noel Clarasó

*Puedes ser solamente una persona para el mundo,
pero para una persona tú eres el mundo
y mi mundo eres tú, te amo mamá,
con todo mi amor este trabajo te lo dedico a ti*

Agradecimientos.

Primero que nadie quiero agradecer a Dios, quien me ha guiado para ser el hombre que hasta ahora soy, pro permitirme cumplir una más de mis metas, por estar ahí cuando pensé que estaba sólo.

A mi madre, esa hermosa mujer que que no sólo ha hecho el papel de padre y madre el mismo tiempo, si no que ha sido, es y será mi gran amiga, confidente, maestra y compañera de vida, gracias madre por estar a mi lado. Te amo y te agradezco por todo, que Dios te bendiga.

A mi abuelo, el gran hombre de mi vida, quien desde el cielo me ha protegido, acompañado y guiado.

A mi hermana y ese par de estrellitas que me ha regalado, Valeria y Paola, por su apoyo incondicional, y su compañía a lo largo de mi vida, las amo, Dios las bendiga.

A toda mi familia, quienes me han apoyado siempre.

Agradezco profundamente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por el apoyo técnico y económico para la realización de este trabajo.

Así mismo agradezco profundamente a mis tutores, al Dr. Marco A. Garzón, no sólo por los conocimientos transmitidos, si no, por enseñarme que el trabajo duro y el esfuerzo continuo son la base para alcanzar el éxito, al M.I. Juan M. Chacón por su experiencia y consejos, a la Dra. Gabriela E. Moeller por todo el apoyo brindado para la realización de este proyecto, así como el aporte técnico y científico que enriquecieron este trabajo, a la Dra. Petia Mijaylova por toda la confianza depositada, su experiencia y conocimientos aportados, así como todo el apoyo brindado durante todo el proceso de formación y redacción de este trabajo, a la M.I. Esperanza Ramírez, quien me enseñó el valor de un trabajo bien hecho, a todo ustedes, gracias.

A mis profesores por la paciencia y la entrega para transmitir sus experiencias y conocimientos.

A la empresa Textiles Mont Blanc, quienes fueron una pieza clave en este proyecto al permitirnos entrar en varias ocasiones para conocer el proceso, así como la donación de los colorantes y aditivos utilizados durante todo el trabajo experimental.

También quiero agradecer a la Dra. Gabriela Mantilla, por todo el apoyo otorgado, técnico y económico aportado para poder culminar este proyecto.

A la M.I. Hivette Hansen, por su apoyo, su amistad, confianza y por los aportes hechos a este trabajo.

A la M.I. Norma Ramírez y a la M.I. Filis Moreno, que muy amablemente aportaron su apoyo con el préstamo de sus instalaciones.

Al mis compañeros del laboratorio de potabilización por permitirme el uso de sus instalaciones.

A mis amigos y compañeros de la planta piloto, la Doña (Liliana), el Doc (Edson), la Quena (Yesi), Gargamel (Mariano), la sucia (Tania), Lili Argüelles, José Manuel, Gaby, Marlé, Ana Laura, Yli, Ernesto, Erika (brisha), Erika (bufandas), Yola, Luis, Lupita, Poncho, Eloy, Bety y por supuesto a doña Silvia, quienes aportaron su granito de arena durante todo este tiempo y en su momento hicieron más ameno el camino para llegar a la meta, lo aprecio y espero poder seguir contando con ustedes.

Al Mc. William Rodríguez, por su apoyo incondicional, así como sus aportes y comentarios al presente trabajo.

A mis compañeros del posgrado, Vane, Alex, Camilo, Víctor y Eduardo quienes no sólo fueron compañeros, si no que nos convertimos en buenos amigos y que definitivamente hicieron de este camino, algo más divertido... (huele a río).

I. - Índice

Capítulo		Página
I	Índice	VII
II	Índice de tablas	X
III	Índice de figuras	XI
IV	Índice de gráficas	XII
V	Abreviaturas	XIV
VI	Resumen	XVI
1	Antecedentes	1
1.1	Proceso de teñido	2
1.1.1	Descrude	2
1.1.2	Enjuagado en caliente	3
1.1.3	Teñido	3
1.1.4	Enjuagado en caliente	3
1.1.5	Jabonado	3
1.1.6	Suavizado	3
1.1.7	Proceso de tratamiento actual del efluente de proceso	4
1.2	Los colorantes	4
1.3	Procesos avanzados de oxidación	6
1.4	Biofiltración sobre empaque orgánico	10
1.5	Sistemas acoplados	12
1.6	Toxicidad	13
2	Planteamiento del problema	16
3	Objetivos	17
3.1	Objetivo principal	17
3.2	Objetivos particulares	17
4	Alcances	18
5	Hipótesis	19
6	Justificación	20

7	Metodología del trabajo experimental	21
7.1	Caracterización del agua residual de una industria textil	21
7.2	Pruebas preliminares de oxidación avanzada con agua residual real	22
7.2.1	Fotólisis de peróxido	23
7.2.2	Foto-Fenton	23
7.3	Elaboración del efluente sintético	24
7.4	Selección del proceso de oxidación avanzada y determinación de dosis óptimas	26
7.4.1	Fotólisis de peróxido	27
7.4.2	Foto-Fenton	27
7.5	Montaje de los biofiltros aerobios sobre cama orgánica	28
7.5.1	Obtención y preparación del material	29
7.5.2	Empaque de los reactores biológicos	30
7.5.2.1	Inoculación del medio de empaque	30
7.6	Acoplamiento del proceso de oxidación avanzado al proceso biológico aerobio de biofiltración sobre cama orgánica	34
7.7	Parámetros de seguimiento del sistema	35
8	Resultados	36
8.1	Caracterización y pruebas preliminares con agua residual real	36
8.1.1	Caracterización	36
8.1.2	Pruebas preliminares de oxidación avanzada	38
8.1.2.1	Fotólisis de peróxido	38
8.1.2.2	Foto-Fenton	39
8.2	Elaboración del efluente sintético	40
8.2.1	Curvas de calibración para la medición de la concentración de la mezcla de los colorantes	43
8.3	Pruebas experimentales con agua residual sintética	46
8.3.1	Selección del proceso de oxidación avanzada y determinación de dosis óptimas	46
8.3.1.1	Fotólisis de peróxido	46

8.3.1.2	Foto-Fenton	48
8.3.1.3	Selección del proceso de oxidación avanzada	49
8.4	Eficiencia del sistema acoplado	51
8.4.1	Remoción de las moléculas de colorante en el proceso acoplado	51
8.4.2	Toxicidad	53
8.4.3	Remoción de la DQO en el proceso acoplado	58
8.4.4	Parámetros de campo	60
8.4.4.1	pH	60
8.4.4.2	Conductividad eléctrica	61
8.4.4.3	Sólidos disueltos totales y salinidad	62
9	Conclusiones	64
10	Recomendaciones	66
11	Anexos	67
Anexo I	Características del ficus utilizado para la biofiltración aerobia sobre material orgánico	67
Anexo II	Tabla de valores de las curvas de calibración para determinación de las concentraciones de los colorantes	69
Anexo III	Resultados analíticos de los procesos de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido	72
Anexo IV	Resultados analíticos de los procesos de oxidación avanzada de foto-Fenton	77
Anexo V	Resultados analíticos de la operación de los reactores para la remoción de colorantes presentes en un agua sintética de un efluente de la industria textil con aditivos y sin aditivos	85
12	Bibliografía	97

II.- Índice de tablas

No.	Nombre	Página
1	Concentración de los reactivos en el proceso de teñido	25
2	Concentraciones de peróxido utilizadas para la obtención de las dosis óptimas en el proceso de fotólisis de peróxido	27
3	Diseño experimental para la obtención de las dosis optimas en el proceso de foto-Fenton	28
4	Caracterización del influente a la planta de tratamiento de aguas residuales de Textiles Mont Blanc.	36
5	Comportamiento de la toxicidad en los procesos combinados día 94	54
6	Resumen del comportamiento de los procesos de tratamiento de agua sintética con y sin aditivos del día 100 al 196	56
7	Comportamiento de la toxicidad en los procesos combinados día 196	57
8	Comportamiento de los sólidos disueltos totales y de las salinidad en los procesos combinados	63

III.- Índice de figuras

No.	Nombre	Página
1	Estructura química del colorante amarillo Triactive DF-RL	5
2	Grupos funcionales base para el colorante rojo Triactive DF-4BL	5
3	Estructura química del colorante rojo Triactive DF-4BL	6
4	Influyente a la planta de tratamiento de Textiles Mont Blanc.	21
5	Fotoreactor de radiación ultravioleta	23
6	Reactores de acrílico para montaje de biofiltros	28
7	Centro de acopio de materiales de poda del municipio de Jiutepec	29
8	Centro de composteo del municipio de Cuernavaca	30
9	Proceso sin aireación- aerobio para la degradación de colorantes tipo azo (Moeller <i>et al.</i> , 2007)	31
10	Toma del inóculo del proceso no aireado- aerobio.	32
11	Mezcla homogeneizada del medio de empaque e inóculo	32
12	Empacado de los biofiltros aerobios	33
13	Biofiltros aerobios con empaque orgánico	33
14	Diluciones para el trazo de la curva de calibración del agua sintética	35
15	Fotografías del ficus	68

IV.- Índice de gráficas

No.	Nombre	Página
1	Barrido UV/Vis de la muestra de agua residual industrial de Textiles Mont Blanc	37
2	Degradación de las moléculas de color mediante el proceso de fotólisis de peróxido, comparación de 3 dosis después de 60min de exposición	39
3	Primera prueba de foto-Fenton para la degradación de las moléculas de colorante a una dosis de 1mL/L de H ₂ O ₂ y 0.4g/L de FeCl ₃	40
4	Barridos individuales de los reactivos utilizados en el proceso de teñido de Textiles Mont Blanc	41
5	Barridos de los colorantes utilizados en el proceso de teñido del caso de estudio	42
6	Curva de calibración de colorantes con aditivos pH 10.7, $\lambda=517\text{nm}$	43
7	Curva de calibración de colorantes con aditivos pH 3, $\lambda=517\text{nm}$	44
8	Curva de calibración de colorantes con aditivos pH 7, $\lambda=517\text{nm}$	44
9	Curva de calibración de colorantes sin aditivos pH 7.4, $\lambda=515\text{nm}$	45
10	Curva de colorantes sin aditivos pH 3, $\lambda=515\text{nm}$	45
11	Comparación de la degradación de la mezcla de colorantes a diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno	46
12	Degradación de las moléculas de colorante mediante el proceso de fotólisis de peróxido con una dosis de 0.2mL/L de peróxido de hidrógeno	47
13	Degradación de las moléculas de colorante mediante el proceso de foto-Fenton a diferentes concentraciones (mL/L de H ₂ O ₂ – g/L de Fe ²⁺)	48

14	Comparación de la degradación al 100% de las moléculas de colorante mediante los procesos de fotólisis de peróxido y foto-Fenton	49
15	Degradación de las moléculas de color mediante los procesos de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido y foto-Fenton	50
16	Degradación de colorantes en el proceso de tratamiento con aditivos	52
17	Degradación de colorantes en el proceso de tratamiento sin aditivos	52
18	Comportamiento de la toxicidad en el proceso acoplado de tratamiento (Día 94)	54
19	Comportamiento de la toxicidad en el proceso acoplado de tratamiento (Día 196)	57
20	Comportamiento de la DQO en el proceso combinado con aditivos	58
21	Comportamiento de la DQO en el proceso combinado sin aditivos	59
22	Comportamiento del pH en el proceso combinado con aditivos	60
23	Comportamiento del pH en el proceso combinado sin aditivos	61
24	Comportamiento de la conductividad en el proceso con y sin aditivos	62

V.- Abreviaturas

% REM	Porcentaje de remoción
[g/L]	Concentración expresada en gramos de soluto por litro de solución
[mg/L]	Concentración expresada en miligramos de soluto por litro de solución
°C	Grados Celsius
ABS	Absorbancia
C/Co	Concentración del componente en el tiempo i con respecto a la concentración inicial
Cl ⁻	Ión cloruro
cm	Centímetros
CO ₂	Bióxido de carbono
COT	Carbono orgánico total
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DI	Diámetro interior
DQO	Demanda química de oxígeno
FAD	Flotación por aire disuelto
g	Gramos
g/L	Gramos por litro de solución
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
L	Litros
L/min	Litros por minuto
M	Concentración molar
m	Metros
min	Minutos
mL	Mililitros
mS/cm ²	Mili siemens por centímetro cuadrado
NA	No aplica
NaCl	Cloruro de sodio

ND	No detectable
nm	Nanómetros
N-NO ₂	Nitrógeno de nitritos
N-NO ₃	Nitrógeno de nitratos
NO ²⁻	Ión nitrito
NO ³⁻	Ión nitrato
N _T	Nitrógeno total
OH [·]	Radical hidroxilo
P/V	Relación peso / volumen
pH	Potencial de hidrógeno
P-PO ⁴⁼	Fósforo como orto-fosfatos
P _T	Fósforo total
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
SF	Sólidos fijos
SSF	Sólidos suspendidos fijos
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
t	Toneladas
U de pH	Unidades de pH
UV	Ultra Violeta
UV/VIS	Ultravioleta / visible
W	Watts

VI.- RESUMEN

El presente trabajo pretende acoplar dos procesos unitarios, uno fisicoquímico y otro biológico, para dar tratamiento a un agua residual sintética de la industria textil; específicamente del proceso de teñido de hilos de diferentes tipos de fibras, con la finalidad de degradar los colorantes incluidos en este tipo de efluentes, reducir la toxicidad generada por estos y remover los aditivos utilizados para la fijación de los colorantes y el tratamiento de las fibras. En primer lugar se comparó la eficiencia de dos procesos de oxidación avanzada: foto-Fenton y fotólisis de peróxido, con la finalidad de seleccionar el más eficiente para alcanzar entre un 50 y 70% de remoción de los colorantes, siendo seleccionada la fotólisis de peróxido como fase de pretratamiento. Para completar el proceso de tratamiento, se utilizó un biofiltro percolador aerobio, empacado con material orgánico (trozos de madera de *Picus benjamina*) de fácil acceso en la región. El biofiltro operó de manera continua con un caudal de alimentación de 1 L/d. Paralelamente, se probó un tren de tratamiento idéntico, utilizando agua residual sintética sin aditivos, con la finalidad de observar el efecto de éstos durante las etapas de tratamiento. Los resultados demostraron que el agua residual sintética con aditivos, requiere 50% más tiempo de contacto que el agua residual sintética sin aditivos para alcanzar la misma remoción de colorantes en el proceso de oxidación avanzada, mientras que para el proceso de biofiltración aerobia sobre material orgánico, la eficiencia del proceso se redujo en promedio un 8%, debido principalmente a la salinidad presente en el agua residual con aditivos. Por otra parte, el comportamiento de la toxicidad generada por los colorantes y los aditivos durante cada etapa de tratamiento, se encontró que durante el proceso de oxidación avanzada, la toxicidad se incrementa cuatro veces con respecto al agua residual con aditivos sin tratar y hasta 20 veces para el agua residual sin aditivos; en ambos casos, la biofiltración aerobia sobre material orgánico fue capaz de remover de 93 hasta 100% esta toxicidad respectivamente. En conclusión, los aditivos utilizados en el proceso de teñido dificultan la degradación de las moléculas de colorante tanto en la oxidación avanzada como en la biofiltración. Por otra parte, la toxicidad que se vio incrementada en el

proceso de oxidación avanzada como consecuencia de la ruptura de las moléculas de colorante y formación de metabolitos intermediarios, fue removida hasta 100% en el proceso de biofiltración aerobia sobre material orgánico.

Palabras clave: procesos de oxidación avanzada, agua residual industrial sintética, colorantes, biofiltración aerobia sobre material orgánico.

1.-ANTECEDENTES

Alrededor de 700,000 t de aproximadamente 10,000 tipos de colorantes y pigmentos son producidos anualmente alrededor del mundo, de los cuales el 20% se descarga en los efluentes industriales Arslan *et al.* (1999). De estos colorantes y pigmentos, no todos pueden ser tratados por métodos convencionales (por ejemplo, sistemas biológicos aerobios o anaerobios, procesos fisicoquímicos como la coagulación) debido a su complejidad poliaromática, o a los metabolitos secundarios generados por la ruptura de dobles ligaduras de los enlaces azo en condiciones anaerobias que, incrementan la toxicidad del efluente más que el mismo colorante (Mansilla *et al.*, 2001). A causa de esto, recientes investigaciones han demostrado la viabilidad de los procesos de oxidación avanzada, empleando H₂O₂ como oxidante y Fe (II) (reacción de Fenton) generando compuestos menos tóxicos al ambiente (Oller *et al.*, 2007). Normalmente en este tipo de tratamientos el 50% del carbono orgánico puede ser transformado a CO₂ (Chacón *et al.*, 2006). Sin embargo, el porcentaje de remoción se puede ver incrementado mediante la incorporación de radiación UV (foto-Fenton), atribuida a la foto-reducción de iones férricos formados durante la reacción. No obstante, estos procesos al día de hoy son de un costo elevado debido a la cantidad de reactivos necesarios.

Entre la composición de las aguas residuales de la industria textil, se encuentran altas concentraciones de materia orgánica, materia no biodegradable, sustancias tóxicas, detergentes, grasas y aceites, sulfuros, alcalinidad y cloruros (hasta 100g/L como NaCl) (Aplin *et al.*, 2000). Adicionalmente, los colorantes vertidos son altamente solubles en agua pero no son biodegradables bajo condiciones típicas de tratamientos biológico (Rodríguez *et al.*, 2002). Existen dos factores principales responsables de que algunos compuestos orgánicos sean recalcitrantes: a) no son enzimáticamente viables para la biocenosis biológica que se lleva a cabo en el tratamiento biológico de aguas residuales y b) la producción de compuestos orgánicos puede ser biodegradable, sin embargo, la constitución del efluente puede contener compuestos (orgánicos o inorgánicos) que inhiben la biocenosis o resultan tóxicos a la comunidad de microorganismos.

Zissi et al. (1996) experimentaron con un sistema de degradación de colorantes del tipo azo bajo condiciones anóxicas empleando un cultivo puro de *Bacillus Subtilis*, el cual es capaz de metabolizar los subproductos de la degradación de algunos colorantes del tipo azo y de utilizar el NO_2^- o NO_3^- como aceptor final de electrones, mostrando el proceso una remoción del 20% de colorante. Sin embargo, se observó la producción de metabolitos secundarios, subproductos de la degradación del colorante, los cuales se encontraron en equilibrio estequiométrico con respecto a un balance de masa, por lo que se determinó que el trabajo realizado por los microorganismos es únicamente la lisis de algunos enlaces del colorante y no una mineralización de este.

1.1 Proceso de teñido

En el estado de Puebla, se localiza Textiles Mont Blanc, que es una filial del grupo Hilos Omega. Ésta es una empresa del ramo textil que se encarga del proceso de teñido de hilos de algodón, sintéticos, mezclas algodón-sintético y otras fibras. Para el proceso de teñido se emplean mezclas de colorantes: una gama de colorantes básicos (para acrílico), reactivos (para algodón), dispersos (para poliéster) y ácidos (para nylon). Para realizar el teñido se cuenta con 3 diferentes máquinas de proceso cuya operación y volumen es diferente, una de estas máquinas de teñido es utilizada para hilos de algodón y tiene una capacidad de 6,000 L.

El agua residual de ésta industria, es el resultado de las siguientes etapas de proceso:

- Descrude;
- Enjuagado en caliente;
- Teñido;
- Enjuague en caliente;
- Jabonado;
- Suavizado.

1.1.1 Descrude

En esta etapa de proceso lo que se hace es preparar el hilo para el teñido. Se adicionan dos químicos denominados Deltawet (2g/L), que es un suavizante o relajante del textil, cuya función es ablandar el hilo para su teñido, y ultravon TPM (2g/L), que es un

detergente empleado para retirar las impurezas y suciedad que trae el hilo. La adición de estos productos se realiza en caliente a una temperatura de 40°C, el tiempo de contacto es de 15 min.

1.1.2 Enjuagado en caliente

El enjuagado se realiza con agua corriente a una temperatura de 70°C durante 13 min.

1.1.3 Teñido

La etapa principal del proceso donde se agregan cuatro reactivos y la mezcla di o tricrómica, es decir una mezcla de dos o tres colorantes según el tipo de tono final deseado. Para el caso del proceso de teñido que nos ocupa se trata de una dicromía donde se emplean Rojo Triactive DF-4BL (1.302 g/L) y Amarillo Triactive DF-RL (0.948 g/L), además de los siguientes aditivos: Hexametáfosfato de sodio (2 g/L), Tricosperce SP40 (2 g/L), sal común (80 g/L) y carbonato de sodio (20 g/L). Estos reactivos son coadyuvantes para la fijación de los colorantes durante el proceso de teñido, no reaccionan con el hilo, únicamente sirven como agentes fijadores de color, por lo tanto son descargados tal y como entran al proceso, la etapa de teñido se lleva a cabo a una temperatura de 80°C durante 20 min.

1.1.4 Enjuagado en caliente

El enjuagado se realiza con agua corriente a una temperatura de 100°C durante 30 min.

1.1.5 Jabonado

Es la etapa de enfriado y lavado del hilo; se lleva a cabo adicionando nuevamente ultravon TPM (2 g/L) durante 15 min a temperatura ambiente.

1.1.6 Suavizado

Es la etapa final de proceso; se adiciona en frío Aquisoft (3 g/L) que es un suavizante de tipo industrial, durante 15 min.

Durante cada una de las etapas se realiza el llenado de la máquina, es decir, si se cuentan los volúmenes empleados durante el proceso de teñido, se tiene un volumen total final de 36,000 L de agua utilizada para el proceso de teñido de un lote de hilos.

1.1.7 Proceso de tratamiento actual del efluente de proceso

El agua residual de proceso es enviada a la planta de tratamiento de la empresa donde el tratamiento realizado consiste en remover el color a través del proceso de coagulación-floculación mediante el adición de un reactivo denominado Sudfloc Ex948 que es un residuo industrial con contenido de sales de hierro y aluminio, ácido sulfúrico, calcio y magnesio. Este reactivo tiene un pH menor a 1 y es empleado como un agente regulador de pH, ya que el agua del influente a la planta de tratamiento llega con un pH entre 12 y 14 unidades. Las sales de hierro y aluminio son coagulantes que atrapan a los colorantes formando flocs que posteriormente son separados mediante un sistema de flotación por aire disuelto (FAD) para posteriormente obtener por separado el lodo químico que es dirigido a un tanque de espesamiento y el agua tratada es descargada al sistema de alcantarillado de la Ciudad de Puebla.

El lodo espesado pasa por un filtro prensa para reducir la cantidad de agua para posteriormente ser almacenado y finalmente llevado a confinamiento en el relleno sanitario de la Ciudad de Puebla.

1.2 Los colorantes

Como ya se mencionó en la descripción del proceso de teñido, los colorantes empleados para obtener el color rojo brillante son el amarillo triactive DF-RL y el rojo triactive DF-4BL, cuyas estructuras moleculares se presentan en las figuras 1, 2 y 3.

El colorante amarillo triactive DF-RL resulta de una mezcla de dos moléculas cuya estructura es la que se presenta en la figura 1, las cuales están constituidas por grupos sulfónicos, halogenados, grupos amino y grupos ácidos. Estas moléculas pueden estar mezcladas en diferentes proporciones de acuerdo al tono final deseado, esta mezcla dimolecular del colorante en particular sería del tipo monoazo en su forma ácida (Lai *et al.*, 2001).

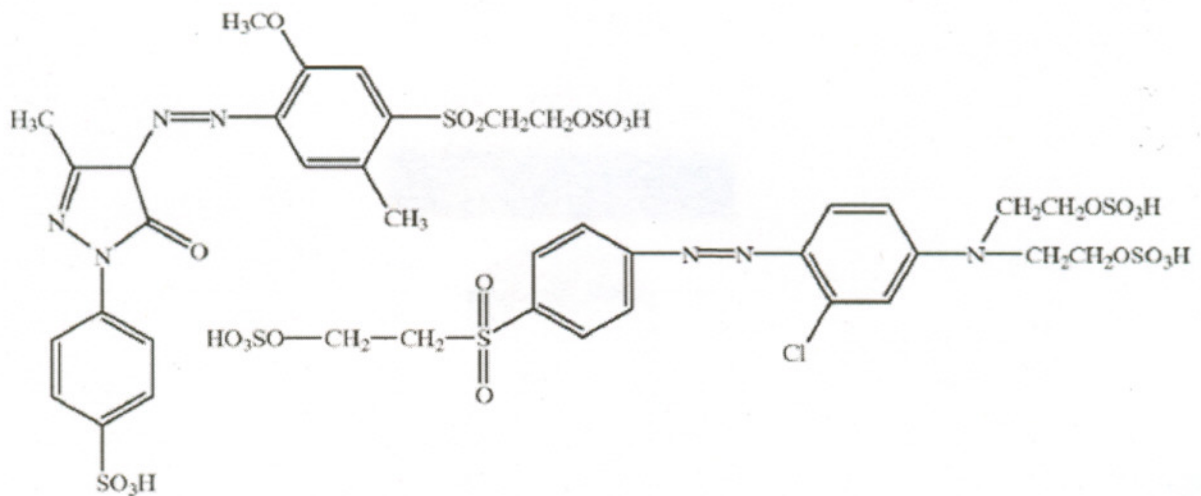


Figura 1. Estructura química del colorante amarillo Triactive DF-RL

Por otra parte, el colorante rojo triactive DF-4BL, tiene una base principal de un grupo difenilo sustituido por grupos amino y sulfónico ligado mediante un enlace del tipo azo a otro anillo sustituido por un grupo sulfónico (figura 2). Este complejo finalmente deberá estar ligado a un anillo triacínico halogenado para ir formando una molécula polimérica que finalmente y de acuerdo a los sustituyentes permite obtener el tono deseado del rojo triactive DF-4BL, el cual consta de una mezcla de tres moléculas complejas, las cuales formarán el colorante que es del tipo diazo (figura 3) (Hihara *et al.*, 1998; Yeh *et al.*, 2000).

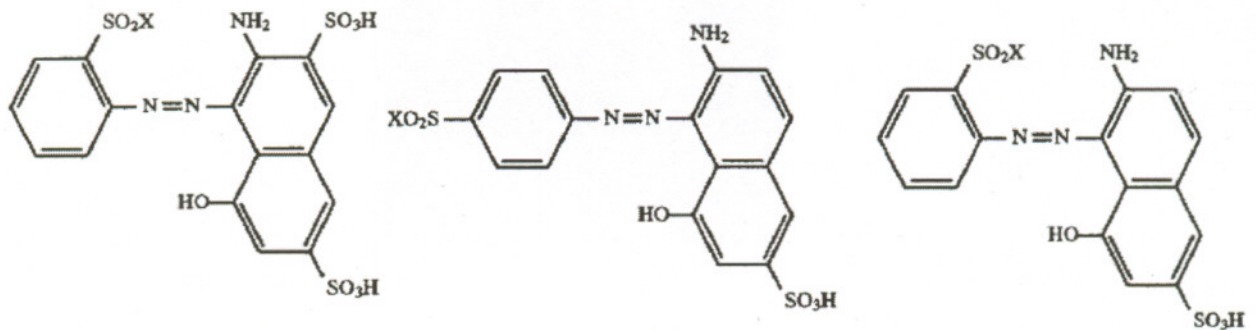


Figura 2. Grupos funcionales base para el colorante rojo Triactive DF-4BL

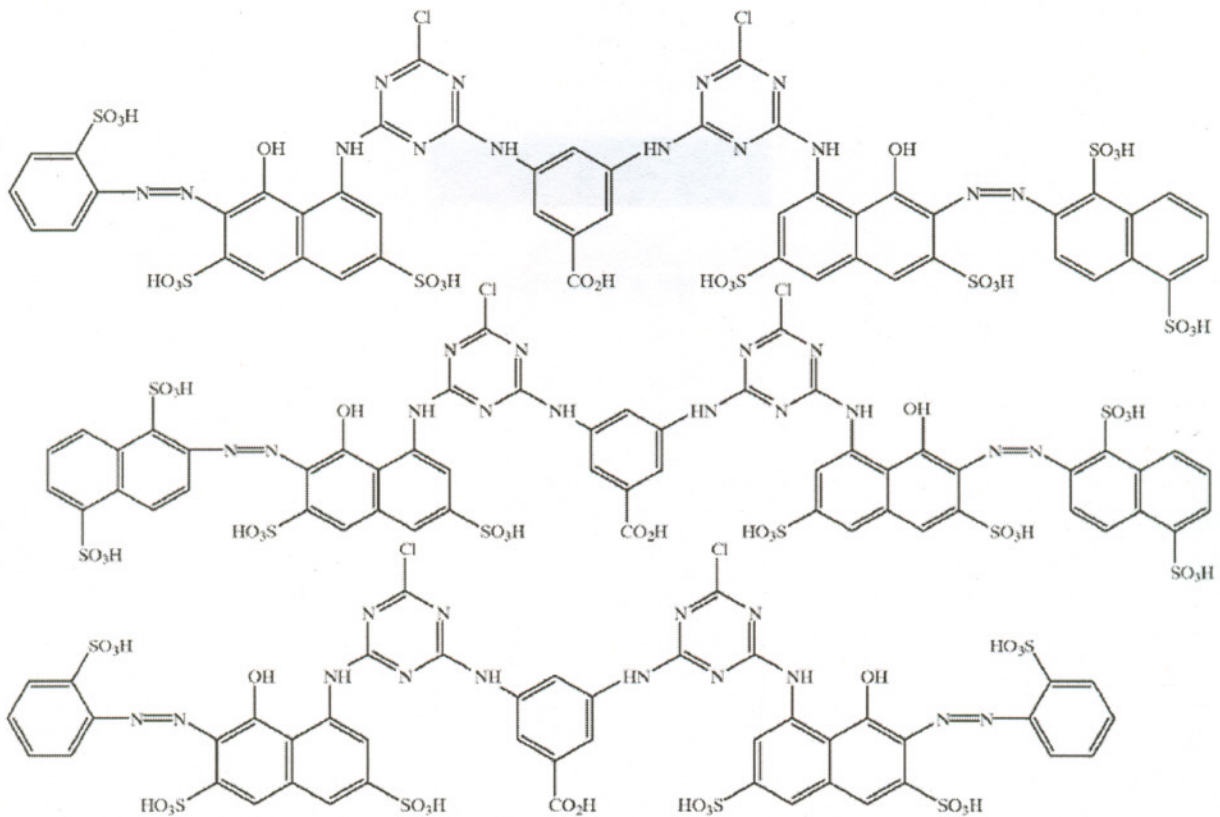


Figura 3. Estructura química del colorante rojo Triactive DF-4BL

1.3 Procesos Avanzados de Oxidación

Los procesos avanzados de oxidación o procesos de oxidación avanzada, han demostrado ser una buena opción para la remoción de contaminantes persistentes presentes en el agua residual, cuando los procesos convencionales de tratamiento no son eficientes (Chacón *et al.*, 2006). Estos procesos de oxidación involucran la generación de especies reactivas altamente oxidantes, con suficiente poder oxidante para completar la degradación de compuestos orgánicos tóxicos hasta transformarlos en CO₂ y agua, (Bandala *et al.*, 2006). Los radicales generados en el proceso son usualmente eficientes en el ataque y degradación de contaminantes orgánicos presentes en el medio ambiente.

Los procesos de oxidación se pueden clasificar en dos grandes grupos: homogéneos y heterogéneos (Domènech *et al.*, 2001).

Procesos homogéneos:

a) Sin aporte de energía externa:

Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)

Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2) y ($O_3/H_2O_2/OH^-$)

Peróxido de hidrógeno y catalizador (H_2O_2/Fe^{2+})

b) Con aporte de energía externa:

b1) Energía procedente de radiación ultravioleta (UV)

Ozonización y radiación ultravioleta (O_3/UV)

Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H_2O_2/UV)

Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta ($O_3/H_2O_2/UV$)

Foto-Fenton ($Fe^{2+}/H_2O_2/UV$)

b2) Energía procedente de ultrasonidos (US)

Ozonización y ultrasonidos (O_3/US)

Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos (H_2O_2/US)

b3) Electroquímica

Oxidación electroquímica

Oxidación anódica

Electro-Fenton

Procesos heterogéneos:

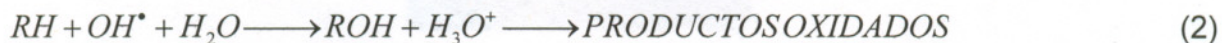
Ozonización catalítica ($O_3/Cat.$)

Ozonización fotocatalítica ($O_3/TiO_2/UV$)

Fotocatálisis heterogénea ($H_2O_2/TiO_2/UV$)

La fotólisis de peróxido tiene su fundamento en la generación de radicales OH^\cdot , mediante la lisis del peróxido por incidencia de un haz energético que puede ser provisto por la radiación solar o por una lámpara de luz ultravioleta Fung *et al.*, (2001), estos radicales generados (1), son los principales actores para la oxidación de los

compuestos recalcitrantes a degradar produciendo moléculas secundarias o metabolitos, bióxido de carbono y agua (2).

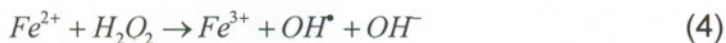


Aris *et al.* (2002) reportaron en una comparación de procesos avanzados de oxidación que, a concentraciones bajas de peróxido es posible obtener mejores resultados en la remoción de colorante y DQO de un efluente industrial que a concentraciones en exceso de peróxido, debido a que la eficiencia del proceso se reduce, ya que, a bajas concentraciones ($10^{-4}M$ de H_2O_2) obtuvieron remociones de 30% de colorante y 45% en remoción de DQO, mientras que a una concentración mayor del reactivo ($10^{-2}M$ de H_2O_2) el proceso tiene una eficiencia del 0% y 25% de remoción en colorante y DQO respectivamente.

Por otra parte, uno de los procesos establecidos de mayor aplicación es la reacción de Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2) la cual ha sido utilizada en un amplio campo de aplicaciones para la depuración de aguas contaminadas con una gran variedad de compuestos químicos, como son los pesticidas, fenoles, hidrocarburos, surfactantes y colorantes. Cuando en el proceso de Fenton se utilizan radiación UV o luz visible, al proceso se le denomina foto-Fenton y los resultados obtenidos presentan grandes ventajas entre las que se incluyen el incremento de la degradación de los contaminantes y el uso de energías alternativas, como es el caso de la luz solar Acero *et al.*, (2001).

Los procesos de oxidación avanzada funcionan mediante mecanismos de reacción que generan radicales hidroxilo que atacan los compuestos orgánicos por atracción de los átomos de hidrogeno o por adición a las dobles ligaduras de las moléculas (Rodríguez *et al.*, 2002). Los principales mecanismos de la reacción de Fenton propuestos por Parra *et al.*, (2001) son:





Como se puede observar en la ecuación 3, la radiación UV aumenta la velocidad de regeneración de los radicales OH^{\bullet} . El Fe^{3+} actúa como un agente catalizador el cual se reduce y se oxida propiciando la regeneración de los radicales OH^{\bullet} (ecuación 4 y 5) incrementándose la reacción de oxidación.

La reacción de foto-Fenton ha demostrado ser más eficiente a pH entre 4 y 2 teniendo su óptimo a pH 3. Sin embargo, Aplin *et al.* (2001) muestran que el proceso puede ser funcional a un pH de 6, con una eficiencia de 70% en la remoción de color, a un tiempo de 60 min; frente a un 100% de remoción a pH de 3 después de 50 min de tiempo de reacción. Así mismo, se muestra que el NaCl tiene un efecto negativo durante los primeros minutos del proceso a una concentración máxima de 5 g/L, sin embargo, a un pH de 3 se tiene una remoción de color de 100% en el mismo tiempo, es decir a los 50 min.

Para la degradación de colorantes orgánicos provenientes de la industria textil se han realizado pruebas experimentales para la degradación de colorantes activos, dispersos, reactivos entre otros con variación en las condiciones, probando primero únicamente luz UV, y posteriormente combinando UV/ $FeSO_4$, UV/ $FeSO_4/H_2O_2$, en intervalos de tiempo de 20, 40, 60, 80 y 100 min. Así se determinó que a partir de 40 minutos de reacción la degradación en un colorante activo, como el rojo brillante X-3B, se mantenía constante, con un 60% de remoción del colorante, la cual fue observada mediante la medición de la absorbancia (Xu y Lu, 2000).

En el caso del nitrobenzeno y algunos de sus subproductos generados por la degradación fotolítica, como son los isómeros del nitrofenol, se ha comprobado que la foto-oxidación puede ser empleada para su degradación (Rodríguez *et al.*, 2000; Goutailler *et al.*, 2001). Se ha estudiado como actúan los compuestos oxidantes en diferentes dosis y en distintos acoplamientos, considerando como sistemas primero a la

radiación UV, posteriormente combinando UV/Fe/ H₂O₂ y UV/H₂O₂. Los mejores resultados se han obtenido en la última combinación, en cuanto a gasto de reactivo y tiempo de reacción, optimizando el proceso de tratamiento de manera importante, ya que se reducen los costos de tratamiento debido al consumo de reactivos.

Por otro lado, Yoon *et al.*,(2000) realizaron una comparación entre los procesos de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido, foto-Fenton y Fenton, para la degradación de un compuesto orgánico recalcitrante, p-clorofenol, encontrando que mientras la fotólisis de peróxido y la reacción de Fenton alcanzaron una remoción del 20%, el proceso de foto-Fenton permitía obtener un 90% de remoción, en un tiempo de reacción de 60 min en ambos casos. Esta eficiencia fue directamente relacionada con la radiación UV, ya que además de favorecer la regeneración de radicales, colabora con la ruptura del compuesto.

Por otra parte, se ha observado que en el caso de la reacción de foto-Fenton las mediciones de color en el rango de 300 a 400nm produce una interferencia positiva, ya que el Fe²⁺, genera una coloración marrón en el efluente. En el caso del peróxido si éste no es agotado completamente mantendrá su poder oxidante hasta que sea completamente consumido provocando un problema grave proveniente de un sistema de tratamiento de agua residual.

1.4 Biofiltración sobre empaque orgánico

Un biofiltro con empaque orgánico es una adaptación de los filtros percoladores, en donde el material de empaque está formado por algún medio orgánico, que puede ser turba, paja, fibras naturales como las maderas, las cuales pueden obtenerse a partir de las podas de árboles de jardines y avenidas, de la comunidad. En la biofiltración intervienen una combinación de procesos, por una parte, procesos físico-químicos de filtración, absorción y adsorción, y por otra parte un proceso biológico de degradación de materia orgánica. El influente al proceso es alimentado por la parte superior del biofiltro y percola a través de una cama de material poroso orgánico permitiendo la colonización de la cama por microorganismos adaptados a los componentes presentes en el agua residual. Estos microorganismos forman una biopelícula que se transforma

en el principal instrumento de depuración (García, 2007), el fluido que atraviesa la cama es retenido por un determinado periodo de tiempo conocido como tiempo de residencia hidráulica.

El proceso de biofiltración con materiales orgánicos se ha estudiado desde la década de los 90's para tratamiento de agua residual Estrada *et al.*, (2004). En el trabajo realizado por Estrada *et al.*, (2004) se probaron diferentes materiales, como es el caso de la turba y trozos de madera, material que fue empleado para el tratamiento de agua residual de la industria petroquímica. Se han obtenido remociones de DQO y de 1-2 dicloroetano de 93% y 99.3% respectivamente (Estrada y García 2004).

De igual manera, para el tratamiento de aguas residuales provenientes de granjas porcícolas, la turba ha demostrado una alta capacidad de remoción de DQO (97%), nitrógeno amoniacal (99%), sólidos suspendidos (99.9%) y patógenos (<99%), además de que el sistema fue capaz de soportar variaciones de carga, manteniendo buenas eficiencias de remoción (Garzón-Zúñiga, *et al.*, 2002; Garzón-Zúñiga, *et al.*, 2007).

Dentro de los materiales empleados para la cama orgánica del medio filtrante, se encuentran la turba, carbón activado, paja cortada en trozos de 5 cm, composta, vermiculita, trozos de madera y mezclas de estos materiales con turba, así como algunos materiales tropicales presentes en México (Garzón-Zúñiga *et al.*, 2006), que han demostrado que la implementación de sistemas de biofiltración en cama orgánica es técnica y económicamente viable en el país utilizando materiales orgánicos de fácil acceso.

García (2007) probó un sistema de tratamiento para remoción del colorante azul directo 2, el cual es orgánico del tipo azo, mediante biofiltración con materiales autóctonos inoculados con hongos. Se demostró la capacidad del sistema para remover el color y DQO, obteniendo remociones de 90% para el color y 4-62% para la DQO, requiriendo un segundo biofiltro para el pulimento del efluente.

Por otra parte, existen una gran variedad de estudios con diferentes materiales de empaque empleados para la degradación y remoción de compuestos aromáticos provenientes de los residuos industriales que se pueden encontrar tanto en fase acuosa como en fase gaseosa, encontrando que bajo ciertas condiciones ambientales y dando un apropiado tiempo de aclimatación de la biomasa en algunos casos y en otros empleando microorganismos especializados, como el caso de hongos, es posible degradar estos compuestos hasta alcanzar niveles moleculares que no son agresivos al medio ambiente o que son fácilmente asimilables por un consorcio bacteriano no especializado en un tratamiento subsiguiente (Lesson *et al.*, 1997; Sorial *et al.*, 1997; Pujol *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2000; Dubé *et al.*, 2000; Irvine *et al.*, 2001; Kijowska *et al.*, 2001; Nicolai *et al.*, 2001; Elhadi *et al.*, 2004; Qi *et al.*, 2005).

1.5 Sistemas acoplados

Actualmente, algunos procesos avanzados de oxidación han sido probados para el tratamiento de efluentes que contienen contaminantes no biodegradables. Los oxidantes más utilizados son H_2O_2 , O_3 y O_2 , así como sistemas combinados de UV/ TiO_2 / H_2O_2 y UV/ Fe^{3+} / H_2O_2 , éstos últimos considerados los más promisorios; ya que las moléculas orgánicas son totalmente mineralizadas a CO_2 y agua. No obstante, a pesar de la alta eficiencia de estos sistemas, su desarrollo se ha visto limitado debido a: 1) los altos costos de operación, 2) los remanentes de H_2O_2 cuando es empleado en exceso y 3) el color residual generado por el Fe^{2+} . Sin embargo, el uso de estos sistemas como fase de pretratamiento para la degradación primaria de los compuestos recalcitrantes es justificado debido a la formación de metabolitos intermedios, ya que, estos compuestos más sencillos generados pueden ser completamente degradados mediante un proceso biológico de tratamiento (Moeller *et al.*, 2003).

Se han estudiado varios sistemas combinados para el tratamiento de efluentes industriales con compuestos recalcitrantes mediante un acoplamiento de sistemas de UV/ Fe^{3+} / H_2O_2 , o TiO_2 soportado en anillos de vidrio para la fase de pretratamiento fotocatalítico y lodos activados para la fase biológica (Krull *et al.*, 1998; Sarria *et al.*, 2001; Möbius *et al.*, 2004; Al Momani *et al.*, 2004; Bacardit *et al.*, 2007, Chacón *et al.*, 2007; Moeller *et al.*, 2008).

El tratamiento de un gran número de compuestos recalcitrantes, provenientes de efluentes industriales con complejas mezclas de contaminantes, ha sido recientemente estudiado utilizando sistemas acoplados de tratamiento y como estrategia general ha sido propuesto un sistema acoplado de procesos avanzados de oxidación con un proceso biológico (Rodríguez *et al.*, 2002 y Moeller *et al.*, 2007).

Dentro de los compuestos recalcitrantes presentes en los efluentes industriales se encuentran los colorantes y sus metabolitos producto de su degradación. Krull *et al.* (1998) establecen que la mayoría de los procesos, ya sea combinados o individuales, transfieren los colorantes de la fase líquida hacia los lodos residuales, los cuales pueden ser químicos si provienen del proceso de coagulación-floculación, o biológicos en los cuales los colorantes pueden integrarse en los bioflóculos por adhesión sin degradarlos. Por esta razón, proponen el uso de un proceso combinado de oxidación avanzada con un proceso biológico anóxico; el proceso de oxidación consiste en la ozonación del agua residual que se ubica a manera de un by-pass acoplado a un proceso biológico anóxico de lodos activados ofreciendo resultados de remoción superiores al 90% medidos como DQO (Hernández *et al.*, 2008).

Bacardit *et al.* (2007) presentan el acoplamiento de un proceso de foto-Fenton a un proceso de biofiltración, usando un reactor empacado con piedras volcánicas de alta porosidad para el tratamiento de agua residual con componentes recalcitrantes. Una de sus principales contribuciones es la neutralización del efluente del proceso de oxidación avanzado a pH 7 mediante la adición de un buffer de fosfatos que a la vez es una aportación de nutrientes para el proceso biológico. Los resultados presentados son de gran interés ya que ofrecen una remoción medida como COT del 80% después de un tiempo de retención hidráulica de 40 h en el reactor biológico.

1.6 Toxicidad

Los ensayos biológicos son herramientas de diagnóstico adecuadas para determinar el efecto de agentes físicos y químicos sobre organismos de prueba bajo condiciones experimentales específicas y controladas. Estos efectos pueden ser de inhibición tanto de las actividades metabólicas como fisiológicas de los organismos, así como de

magnificación o bioacumulación, evaluados por la reacción de los organismos, tales como muerte, crecimiento, proliferación multiplicación, cambios morfológicos, fisiológicos, o histológicos (Castillo *et al.*, 2004).

Los efectos pueden manifestarse a diferentes niveles, desde estructuras subcelulares o sistemas de enzimas, hasta organismos completos, poblaciones o comunidades. Por lo tanto la toxicidad será la capacidad de una sustancia para ejercer un efecto nocivo sobre un organismo o la biocenosis, y dependerá tanto de las propiedades químicas del compuesto, como de su concentración, según sea la duración y frecuencia de la exposición al tóxico y su relación con el ciclo de vida del organismo (Castillo *et al.*, 2004).

El propósito de las pruebas de toxicidad es obtener información útil para lograr la protección de los organismos acuáticos de una especie determinada o, de todas las comunidades que integran la biota de un ecosistema, de los peligros ocasionados por las sustancias peligrosas arrojadas al ambiente.

Ramírez *et al.* (2005) mencionan que dentro de la gama de organismos para la determinación de la toxicidad de una sustancia, los más frecuentemente utilizados como indicadores son *Daphnia magna* y *Vibrio fisheri*, ya que estos organismos presentan mayor sensibilidad a la presencia de compuestos químicos, y por otra parte, mencionan a *Selenastrum capricornutum* como un organismo sensible a compuestos orgánicos semivolátiles. De igual manera, en este mismo estudio, se hace una comparación entre estos tres organismos para determinar cuál de ellos presenta mayor sensibilidad hacia los compuestos en cuestión, y evitar la interferencia por otras condiciones ambientales, como lo es la alta conductividad eléctrica generada por la salinidad, encontrando que el organismo que puede ofrecer esta opción es *Selenastrum capricornutum*.

Esta puntualización para el caso de estudio en particular de los efluentes de la industria textil es de relevante importancia ya que en estas aguas residuales podemos encontrar concentraciones de hasta 100 g/L de sal (Rodríguez *et al.*, 2002), y teniendo este

antecedente, es posible hacer una mejor selección del tipo de prueba a realizar, sin caer en errores o interferencias en los resultados, ya que lo que nos interesa es la toxicidad del colorante y sus metabolitos, reportados como carcinogénicos (Moeller *et al.*, 2003 y García, 2007).

2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la legislación mexicana en materia de descarga de aguas residuales no incluye dentro de los parámetros de control para la descarga de efluentes el color, la demanda química de oxígeno y la toxicidad, lo cual ha motivado al sector industrial a sólo limitarse, en el mejor de los casos al seguimiento de los parámetros que la norma marca como obligatorios. Sin embargo, se sabe desde hace tiempo que en el caso específico de la industria textil existen en las descargas de agua residual colorantes que resultan no biodegradables e incluso tóxicos, lo que ha motivado al desarrollo y acoplamiento de tecnologías para la degradación de colorantes, tanto orgánicos, como inorgánicos.

Como ejemplo de lo anterior, se tiene el caso específico de la empresa Textiles Mont Blanc, cuyo giro industrial es el teñido de hilos de fibras tanto naturales como sintéticas. El uso del agua para el proceso de producción en esta empresa es de 300-500 m³/d, de la cual más del 95% es descargada al sistema de alcantarillado de la ciudad sólo con el tratamiento de floculación mencionado en el capítulo 1.1.7, sin tomar en cuenta las cargas de contaminantes orgánicos que contiene.

Por esta razón, Textiles Mont Blanc está interesada en el planteamiento de un proceso viable que le permita contaminar menos y reutilizar el agua tratada en el proceso de producción para reducir los costos de extracción y descarga. Por esta razón, se hace necesario el estudio y desarrollo de procesos que permitan la degradación de los colorantes presentes en las descargas de aguas residuales de esta industria textil, sus metabolitos generados durante el proceso de tratamiento, y la remoción de la toxicidad en el efluente.

3.- OBJETIVOS

3.1 Objetivo principal

Determinar la eficiencia de un sistema de tratamiento para la remoción de colorantes en un efluente de la industria textil utilizando un proceso de oxidación avanzada acoplado a un proceso biológico aerobio de biofiltración sobre cama orgánica.

3.2 Objetivos particulares

Evaluar los procesos de fotólisis de peróxido y foto-Fenton para seleccionar el más adecuado para la degradación de la mezcla de colorantes presentes en el efluente de una industria textil.

Determinar las condiciones óptimas del proceso de oxidación avanzada seleccionado (dosis de reactivo, tiempo de exposición).

Evaluar el funcionamiento de un sistema de tratamiento biológico de biofiltración sobre lecho orgánico de empaque como pulimento para mejorar la calidad del efluente del proceso fisicoquímico, buscando la remoción de subproductos intermediarios con la consecuente disminución de la toxicidad.

4.- ALCANCES

Se determinarán las condiciones óptimas de operación del proceso de oxidación avanzada, que ofrezcan los mejores niveles de remoción de colorantes en relación a consumo de reactivos y tiempo de reacción.

Determinar el efecto de los aditivos industriales utilizados en el proceso de teñido presentes en el agua residual, sobre los procesos de tratamiento.

La degradación de los colorantes y su transformación en metabolitos secundarios, generados luego de la ruptura del doble enlace del tipo Azo, se determinará con base en la disminución de la DQO y la variación de la toxicidad.

5.- HIPÓTESIS

Utilizando una dosis óptima de reactivos en el proceso de oxidación avanzada se romperán la mayor cantidad de enlaces de grupos cromóforos generándose productos intermediarios. En el proceso biológico se completará la degradación de las moléculas del colorante así como de los productos intermedios y se reducirá la toxicidad del efluente.

6.- JUSTIFICACIÓN

Los colorantes orgánicos e inorgánicos empleados en la industria textil han sido estudiados en los últimos años con la finalidad de proponer sistemas de tratamiento para su degradación, sin embargo, la mayoría de las tecnologías propuestas no son económicamente viables ya que representan costos cuya recuperación es a largo plazo, la operación y mantenimiento tienen un costo elevado, lo que repercute negativamente en la voluntad de invertir en este tipo de instalaciones.

Sin embargo, con la problemática de abastecimiento de agua de la mayoría de las ciudades del país, el interés por su reutilización tanto en la industria como en los municipios ha ido cada vez en incremento con la consiguiente necesidad de implementar sistemas de tratamiento a sus efluentes, conllevando un ahorro importante en los costos de extracción al reducir los volúmenes requeridos y descargar aguas tratadas que pueden ser empleadas para sistemas de riego.

En el caso particular de la industria textil, los productos de degradación de algunos colorantes, incrementan la toxicidad del efluente, ya que, estos metabolitos pueden incluir radicales libres, compuestos orgánicos persistentes, orgánicos volátiles, halogenados, nitrogenados entre otros, que al estar mezclados en un solo sistema multiplican su toxicidad.

Por esta razón, la presente propuesta consiste en acoplar un sistema de oxidación avanzada a un sistema biológico aerobio de biofiltración sobre cama orgánica, donde se probarán diferentes combinaciones para la oxidación avanzada, que permitan romper las moléculas complejas de los colorantes en subproductos, los cuales serán biodegradados en el proceso de biofiltración aerobia sobre material orgánico, con el objetivo de mejorar la calidad del efluente y reducir la toxicidad generada por los metabolitos intermedios.

7.- METODOLOGÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

7.1 Caracterización del agua residual de una industria textil

Para la realización del presente trabajo, se realizó la caracterización de una muestra del afluente a la planta de tratamiento de Textiles Mont Blanc con la finalidad de conocer las propiedades del agua residual generada y posteriormente preparar en el laboratorio de manera sintética un influente con las características de calidad semejantes al influente real.



Figura 4. Influyente a la planta de tratamiento de Textiles Mont Blanc.

La caracterización se realizó empleando técnicas espectrofotométricas (Espectrofotómetro HACH DR2400), para determinar: nitrógeno total, nitrógeno de nitritos, nitratos, fósforo total, orto-fosfatos y DQO. Los sólidos se determinaron mediante técnicas gravimétricas. El carbono orgánico total se determinó mediante el Autosampler ASI-5000 for Total Organic Carbon Analyzer TOC-500/5050. Los cloruros, la DBO, y el resto de los parámetros se determinaron de acuerdo con los Métodos estándar (1998) Los barridos espectrofotométricos para determinar los picos máximos de influencia de los colorantes, se realizaron en el espectrofotómetro UV/Vis Cintra 5.

7.2 Pruebas preliminares de oxidación avanzada con agua residual real

Los procesos de oxidación avanzada propuestos para el desarrollo experimental son la fotólisis de peróxido y Foto-Fenton, que consiste básicamente en las combinaciones UV/H₂O₂, y UV/Fe²⁺/H₂O₂ respectivamente. Debido a que el contenido de la mezcla de colorantes y aditivos empleados en el proceso de teñido de Textiles Mont Blanc era desconocida, se hicieron pruebas preliminares con cada uno de estos procesos, con la finalidad de verificar si es posible oxidar las moléculas de la mezcla de los colorantes.

Las pruebas preliminares de oxidación avanzada se llevaron a cabo en un foto-reactor (Fig. 5) que consta de un tanque de mezclado fabricado en vidrio con capacidad de 1.1 L color ámbar o de lo contrario recubierto con papel aluminio para evitar el paso de la luz, una parrilla de agitación, una bomba peristáltica Cole-Palmer modelo 7553-20 con controlador de velocidad variable de 6 a 600 rpm; una cámara de radiación ultravioleta que consta de dos lámparas de luz UV de vapor de mercurio de baja presión germicidas marca General Electric (GE) de 15 W, que emiten luz monocromática a una longitud de onda de 253 nm, dos deflectores parabólicos (uno para cada lámpara), dos tubos concéntricos fabricados en cuarzo el tubo exterior de diámetro interior de 2" y el interior de 1" con una longitud de 60 cm para tener un volumen de 300 mL. Un sistema de recirculación conectado a la salida de la cámara de radiación mediante tubería de ¼" fabricada en poliducto reforzado (Moeller *et al.*, 2007).



Figura 5. Fotoreactor de radiación ultravioleta.

7.2.1 Fotólisis de peróxido

Para determinar si el proceso de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido era viable en el tratamiento del agua residual con colorantes se procedió de la siguiente manera: se acidificó 1 L de muestra de agua residual a un pH de 3 con ácido sulfúrico concentrado, posteriormente se llenó el reactor de radiación UV con la muestra acidificada mediante un sistema de bombeo con un gasto de 1 L/min. Una vez que el reactor se llenó, se adicionó 1mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 50% P/V HACH, se encendieron las lámparas de luz ultravioleta y a partir de este momento se tomó el tiempo de reacción. Para el seguimiento del proceso se tomaron muestras del influente al proceso, del efluente tratado a los 30 min y del efluente tratado a los 60 min para que posteriormente se realizaran barridos espectrofotométricos.

7.2.2 Foto-Fenton

En las pruebas preliminares con el proceso de oxidación avanzada foto-Fenton, el procedimiento empleado consistió de la toma de 1 L de agua residual que fue colocada

en un vaso de precipitados de 1.1 L de capacidad, se colocó en una parrilla de agitación a una velocidad de agitación que permita un buen mezclado sin derramar líquido, ni generar espumas, posteriormente la muestra fue acidificada hasta un pH de 3 con ácido sulfúrico concentrado, a continuación se llenó el fotoreactor mediante un sistema de bombeo a una velocidad de 1 L/min, una vez que el sistema se estabilizó con respecto al caudal, se adicionaron 0.4 g de cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) J. T. Baker equivalente a 0.08 g de Fe^{3+} , se dejó homogeneizar la solución durante 30 s y se agregó 1 mL de (H_2O_2) al 50% P/V HACH, se encendieron las lámparas de radiación ultravioleta y se comenzó el conteo del tiempo de reacción y el seguimiento a la reacción tomando muestras de 10 mL de agua tratada a los 30 min y 60 min para que posteriormente se hicieran los barridos espectrofotométricos.

Una vez que se determinó que los procesos de fotólisis de peróxido y foto-Fenton son eficientes en la remoción de colorante en el agua real, se realizó una segunda visita a la planta de teñido con la finalidad de obtener mayor información respecto de los componentes del proceso de teñido. Como resultado de esta visita se obtuvieron muestras de cada uno de los aditivos empleados en el proceso de teñido, así como una muestra de los colorantes y la hoja de proceso empleada el día en que se realizó el primer muestreo.

7.3 Elaboración del efluente sintético

Después de que fue realizada la caracterización y que se obtuvieron los aditivos, los colorantes y la hoja de proceso de teñido donde se indican las proporciones de cada uno de los aditivos y colorantes que se utilizaron para el teñido el día que se realizó el muestreo inicial y su caracterización, se procedió a elaborar el efluente sintético.

Como ya se describió en la introducción el proceso de teñido consta de 6 etapas (Tabla 1) adicionando diferentes combinaciones de reactivos en cada una por lo cual se procedió a elaborar el efluente sintético de acuerdo al siguiente procedimiento.

Tabla 1. Concentración de los reactivos en el proceso de teñido

Soluciones preparadas para la elaboración del efluente de proceso de teñido de Textiles Mont Blanc.		
Etapa	Reactivo	Concentración g/L
Descrude	Deltawet	1
	Ultravon TPM	1
Enjuagado en caliente	Agua corriente	NA
Teñido	Hexametáfosfato de sodio	1
	Tricosperce SP40	1
	Rojo Triactive DF-4BL	0.3906
	Amarillo Triactive DF-RL	0.2844
	Cloruro de sodio	40
	Carbonato de sodio	10
Enjuagado en caliente	Agua corriente	NA
Jabonado	Ultravon TPM	1
Suavizado	Aquisoft	1.5
Mezcla de colorantes aditivos para el proceso testigo.	Rojo Triactive DF-4BL	0.3906
	Amarillo Triactive DF-RL	0.2844

En un matraz volumétrico de 1 L se colocaron aproximadamente 500 mL de agua corriente, se pesaron 1 g de deltawet y 1 g de ultravon TPM, se colocaron los dos reactivos en el matraz con cuidado de que no se generaran espumas, se aforó a 1 L y se agitó ligeramente hasta homogeneizar para obtener la mezcla de la etapa del descrude, posteriormente seguiría la etapa de enjuagado en donde únicamente se agrega agua corriente para lo cual se midió 1 L.

Para la etapa de teñido en otro matraz volumétrico de 1 L se vierten aproximadamente 500 mL de agua corriente, se pesaron 1 g de hexametáfosfato de sodio, 1 g de tricosperce SP40, 0.3909 g de colorante rojo triactive DF-4BL, 0.2844 g de colorante amarillo triactive DF-RL, 40 g de cloruro de sodio y 10 g de carbonato de sodio, se agregaron todos los reactivos en el matraz, se agitó hasta disolver completamente

todos los reactivos y se aforó a 1 L de solución con agua corriente, obteniendo así el efluente de la etapa de teñido. La siguiente etapa consiste del enjuagado por lo que sólo se mide 1 L de agua corriente.

Posteriormente para la etapa de jabonado se colocó en un matraz aforado de 1 L 500 mL de agua corriente se pesó 1 g de ultravon TPM y se vertió en el matraz, se aforó hasta la marca de 1 L y se mezcló hasta homogeneizar. Por último sigue la etapa de suavizado para la cual se vertieron en un matraz aforado de 1 L aproximadamente 500 mL de agua corriente, se pesaron 1.5 g de aquisoft, se agregó al matraz, se aforó a 1 L y se agitó hasta completa homogeneización.

Finalmente en total se obtuvieron 1 L de solución o de agua corriente para cada etapa del proceso de teñido, se colocaron en un recipiente de 10 L de capacidad y se obtuvo una mezcla final de 6 L con las características del efluente real.

Para poder evaluar si los aditivos utilizados en el proceso de teñido afectan la remoción de colorantes, tanto en el proceso de oxidación avanzada, como en el proceso de biofiltración, se preparó una solución de colorantes sin aditivos de la siguiente manera: en un matraz aforado de 1 L se adicionó aproximadamente 500 mL de agua corriente, se pesaron 0.06515 g de colorante rojo triactive DF-4BL y 0.0474 g de amarillo triactive, se adicionaron al matraz volumétrico, se agitó hasta mezclar completamente y se aforó a 1 L.

De cada una de las soluciones preparadas se tomó 1 L para ingresarla a los procesos de oxidación avanzada. Posteriormente se realizó la selección y determinación de dosis óptimas para la degradación de colorantes.

7.4 Selección del proceso de oxidación avanzada y determinación de dosis óptimas

La selección del proceso de oxidación avanzada se basó en la eficiencia de remoción comparada contra el tiempo de reacción y la concentración de los reactivos requeridos para degradar las moléculas de color.

7.4.1 Fotólisis de peróxido

La experimentación con los procesos de oxidación avanzada comenzaron con la fotólisis de peróxido de acuerdo al siguiente procedimiento: se toma una muestra de 1 L de agua sintética con colorantes y aditivos (preparada de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 7.3), esta muestra fue colocada sobre una parrilla de agitación y se procedió a agitarla, se acidificó hasta un pH de 3 adicionando 1 mL de ácido sulfúrico concentrado, posteriormente se comenzó el llenado del foto-reactor a un caudal de 1 L/min, se adicionó el volumen de peróxido de hidrógeno según lo especificado en la Tabla 2, se encendieron las lámparas de UV y se inició el conteo del tiempo de reacción el cual se fijó a 60 min aunque en ciertos casos se prolongó hasta que la remoción de colorante alcanzó el 50%, tomando muestra del agua tratada cada 5 min durante la primera hora y posteriormente los tiempo de muestreo se espaciaron cada 10 min. Estas muestras fueron tomadas para la cuantificación de la degradación de las moléculas de colorante en el agua. Una vez que se determinó la concentración del colorante en el espectrofotómetro, la muestra se retornó al tanque de agitación. Al minuto 20, 30, 40 y 60 se tomó una muestra de 10 mL y se realizó un barrido espectrofotométrico donde se observaron los cambios en todo el espectro, el proceso se detuvo una vez que transcurrieron 60 min o hasta que se alcanzó una remoción de al menos 50% de color.

Tabla 2. Concentraciones de peróxido utilizadas para la obtención de las dosis óptimas en el proceso de fotólisis de peróxido

Dosis de H ₂ O ₂ 50% P/V (mL/L)			
1	0.8	0.4	0.2

7.4.2 Foto-Fenton

El siguiente paso fue determinar la eficiencia del proceso de foto-Fenton en la remoción de colorante. El procedimiento consistió en acidificar 1 L de agua residual sintética con colorantes y aditivos preparada como se describió en el apartado 7.3, el procedimiento seguido para este sistema es similar al descrito para la fotólisis de peróxido, con la diferencia de que se adicionan diferentes concentraciones de Fe²⁺ en forma de sulfato ferroso, (Tabla 3) de acuerdo al diseño propuesto.

Tabla 3. Diseño experimental para la obtención de las dosis óptimas en el proceso de foto-Fenton

Dosis de Fe ²⁺ (g/L)	Dosis de H ₂ O ₂ 50% P/V (mL/L)			
0.02152	1	0.8	0.4	0.2
0.01076				
0.00538				
0.00269				

El proceso seleccionado, fue aquel en el que se requirió la concentración más baja de reactivos y menor tiempo de reacción que permitiera alcanzar una remoción del 50% de las moléculas de colorantes.

7.5 Montaje de los biofiltros aerobios sobre cama orgánica

Para el desarrollo de la etapa biológica de tratamiento se montaron dos biofiltros aerobios con volumen de cama filtrante de 9 L. El medio filtrante está soportado sobre grava fina de tipo pecera que permite la difusión del aire y el paso del agua tratada, la aireación fue provista por la parte inferior de los reactores a través de un difusor. La línea es alimentada mediante un compresor de aire y el flujo es controlado a través de un sistema de válvulas.



Figura 6. Reactores de acrílico para montaje de biofiltros.

El medio orgánico de cama filtrante consta de trozos de madera de ficus, árbol con alta presencia en la región, lo que hizo de este material una materia prima de fácil obtención.

7.5.1 Obtención y preparación del material

El material de empaque se consiguió a través del centro de acopio de materiales de poda que realiza el personal adscrito al área de parques y jardines del municipio de Jiutepec en el estado de Morelos, una vez que se reunió una cantidad de material grueso suficiente, fue llevado a triturar al centro de composteo del municipio de Cuernavaca.



Figura 7. Centro de acopio de materiales de poda del municipio de Jiutepec.



Figura 8. Centro de composteo del municipio de Cuernavaca.

Una vez que el material había sido triturado, se procedió a realizar el tamizado del material con un agitador de tamices W. S. Tyler modelo RX-29 empleando mallas de 25 cm DI con tamaño de abertura de $\frac{1}{2}$ " , $\frac{3}{8}$ " y $\frac{1}{4}$ ". El retenido en las mallas $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ " , así como el material que pasa por la malla $\frac{1}{4}$ " , fueron desechados. El retenido en la malla $\frac{1}{4}$ " fue almacenado para posteriormente empaquetar los reactores biológicos.

7.5.2 Empaque de los reactores biológicos

El material tamizado con tamaño de malla $\frac{1}{4}$ " fue medido hasta un volumen de 18 L con una probeta plástica de 1 L, posteriormente este volumen de material tamizado fue humedecido con agua corriente hasta alcanzar una humedad aproximada del 60%.

7.5.2.1 Inoculación del medio de empaque

En la planta piloto de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua existe un sistema de tratamiento de

colorantes del tipo azo. Este proceso de tratamiento consiste de un biofiltro sin aireación, otro aerobio y finalmente una columna de carbón activado granular como pulimento. Este sistema de biomasa fija fue empacado hace aproximadamente 2 años, por lo que se sabe contiene una biomasa completamente aclimatada para la degradación de colorantes, motivo por el cual se utilizó 0.5 L del material de empaque para inocular cada una de las columnas de biofiltración.

El inoculo extraído del biofiltro sin aireación fue mezclado con el medio de empaque previamente humedecido hasta homogeneizar la mezcla y posteriormente se empacaron las dos columnas aerobias. Como ya fue mencionado, el medio de empaque esta soportado por una cama de grava fina, con tamaño de malla de ¼" que a su vez está colocada sobre una malla perforada que permite una distribución uniforme del aire a través de la columna (Ver figuras 9 – 13).



Figura 9. Proceso sin aireación- aerobio para la degradación de colorantes tipo azo (Moeller et al., 2007)



Figura 10. Toma del inocular del proceso no aireado- aerobio.



Figura 11. Mezcla homogeneizada del medio de empaque e inocular.



Figura 12. Empacado de los biofiltros aerobios.



Figura 13. Biofiltros aerobios con empaque orgánico

Una vez que se completó el empacado de los biofiltros con el medio orgánico, se colocó sobre la capa final del lecho, una cama de viruta de aserrín, con la finalidad de favorecer la distribución del afluente.

Finalmente, cuando los biofiltros estuvieron completamente empacados, se comenzó a alimentarlos con agua residual sintética pretratada mediante el proceso de oxidación avanzada seleccionado. La alimentación del agua residual sintética pretratada se hizo por la parte de arriba y ésta percola por gravedad hacia el fondo. El caudal de alimentación a los biofiltros fue a 1 L/d en continuo sin recirculación.

7.6 Acoplamiento del proceso de oxidación avanzado al proceso biológico aerobio de biofiltración sobre cama orgánica

Finalmente, se ajustaron los tiempos de reacción y la concentración de reactivos en el proceso de oxidación avanzada para permitir el acoplamiento de ambos procesos y poder obtener una máxima degradación.

Para evaluar la eficiencia del tren de tratamiento, se determinaron: la degradación de las moléculas de los colorantes, la disminución de la toxicidad y remoción de la DQO en ambas etapas de tratamiento (oxidación avanzada y biofiltración aerobia sobre cama orgánica), utilizando agua residual sintética con y sin aditivos. El primer biofiltro se operó con la mezcla de colorantes y aditivos (descrita en el apartado 7.3), el segundo biofiltro, se operó con sólo una mezcla de los colorantes utilizados en el proceso de teñido. Después de la oxidación, esta se introducía al segundo biofiltro. En ambos casos, el pH del agua pretratada fue ajustado a 7 con hidróxido de sodio 1N antes de ingresar a los biofiltros.

La finalidad de probar el proceso combinado con dos tipos de agua fue comprobar si la combinación del proceso de oxidación avanzada con la biofiltración aerobia sobre cama orgánica soporta la carga de todos los aditivos utilizados durante el proceso de teñido y cuál es su eficiencia de remoción o determinar si el proceso es eficiente únicamente para remover los colorantes, así como determinar el efecto tóxico por separado de los colorantes y sus metabolitos y de colorantes más aditivos.

7.7 Parámetros de seguimiento del sistema

Durante el desarrollo experimental se monitorearon los parámetros de campo (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y salinidad), la concentración de las moléculas de colorante, la DQO, y se determinó en dos ocasiones la toxicidad. El monitoreo se realizó tomando muestras en el afluente al proceso de oxidación, afluente y efluente de los biofiltros.

Para las mediciones de color se hicieron curvas de calibración para cada uno de los colorantes por separado, de la mezcla de colorantes sin aditivos y de la mezcla de colorantes con aditivos. Estas curvas fueron obtenidas al pH normal de las soluciones, el cual fue de alrededor de 11 para el agua con aditivos y de 8 para el agua sin aditivos, a pH de 7 y a pH de 3 para cada tipo de agua, ya que estas fueron las condiciones de trabajo del agua durante los procesos de tratamiento.



Figura 14. Diluciones para el trazo de la curva de calibración del agua sintética

8.- RESULTADOS

8.1 Caracterización y pruebas preliminares con agua residual real

8.1.1 Caracterización

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la caracterización del agua residual que ingresa a la planta de tratamiento de Textiles Mont Blanc. De esta caracterización se observaron principalmente el alto contenido de fósforo total que es atribuible al detergente utilizado en el proceso de teñido, la concentración de cloruros, debidos al cloruro de sodio que es empleado para la fijación de los colorantes sobre el tejido y la alta carga de DQO que es atribuible a la mezcla de los colorantes y aditivos del proceso. Siendo el carbono orgánico total (COT) 4 veces menor que la DQO lo cual indica que es un agua con una relativamente baja biodegradabilidad.

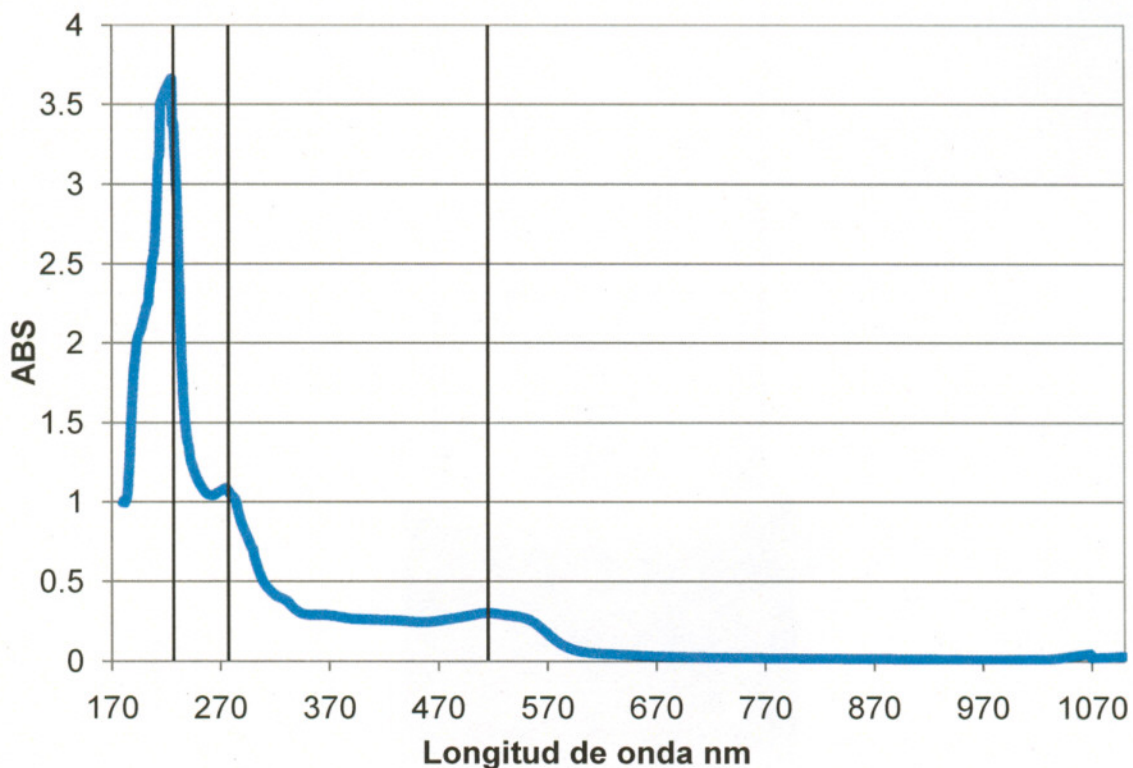
El agua residual presenta una alta concentración de sólidos disueltos lo que permite inferir que no hay arrastre de fibras durante el proceso de teñido, motivo por el cual no se supone aportación de carga orgánica por estas fibras.

Tabla 4.- Caracterización del influente a la planta de tratamiento de aguas residuales de Textiles Mont Blanc.

Parámetro	Concentración (mg/L)	Parámetro	Concentración (mg/L)
NT	60	SST	0.17
N-NO ₂	55	SSV	0.02
N-NO ₃	1	SSF	0.15
PT	192	ST	4,450
P-PO ⁴⁼	34	SV	71.1
Cl ⁻	2,920	SF	4,378
DQO	820	DBO	210
COT	197		

Dentro de la caracterización realizada al efluente del proceso de teñido se incluyó un barrido espectrofotométrico en el espectro ultravioleta-visible, es decir, en el rango de

180 a 1,100 nm con la finalidad de localizar la longitud de onda máxima a la que absorben la mezcla de los colorantes, para posteriormente hacer el trazo de las curvas de calibración y poder medir la disminución de la concentración de moléculas de colorante. De este barrido (Gráfica 1), las máximas absorbancias (ABS) se observan a los 225, 277 y 517 nm. Los dos primeros picos (225 y 277 nm) son atribuibles a los aditivos utilizados durante el proceso de teñido y las absorbancias significantes de los colorantes se encuentran principalmente en el espectro visible. Se sabe que los colorantes amarillos absorben en un rango de longitud de onda entre 300 y 400 nm y los colorantes rojos entre 400 y 500 nm (Anónimo 2002). La mezcla de colorantes contenida en el agua otorga un tono final rojo, por lo tanto se asume que la máxima absorbancia de la mezcla de estos colorantes se localiza a los 517 nm.



Gráfica 1 Barrido UV/Vis de la muestra de agua residual industrial de Textiles Mont Blanc

En la selección de la máxima absorbancia sucede que cuando se tiene una mezcla de varios componentes la longitud de onda donde ocurre la máxima absorbancia se puede ver modificada ya sea por adición o por interacción química entre los componentes que

generen un nuevo compuesto, en el caso de los colorantes lo que sucede es una adición de las absorbancias entre ellos.

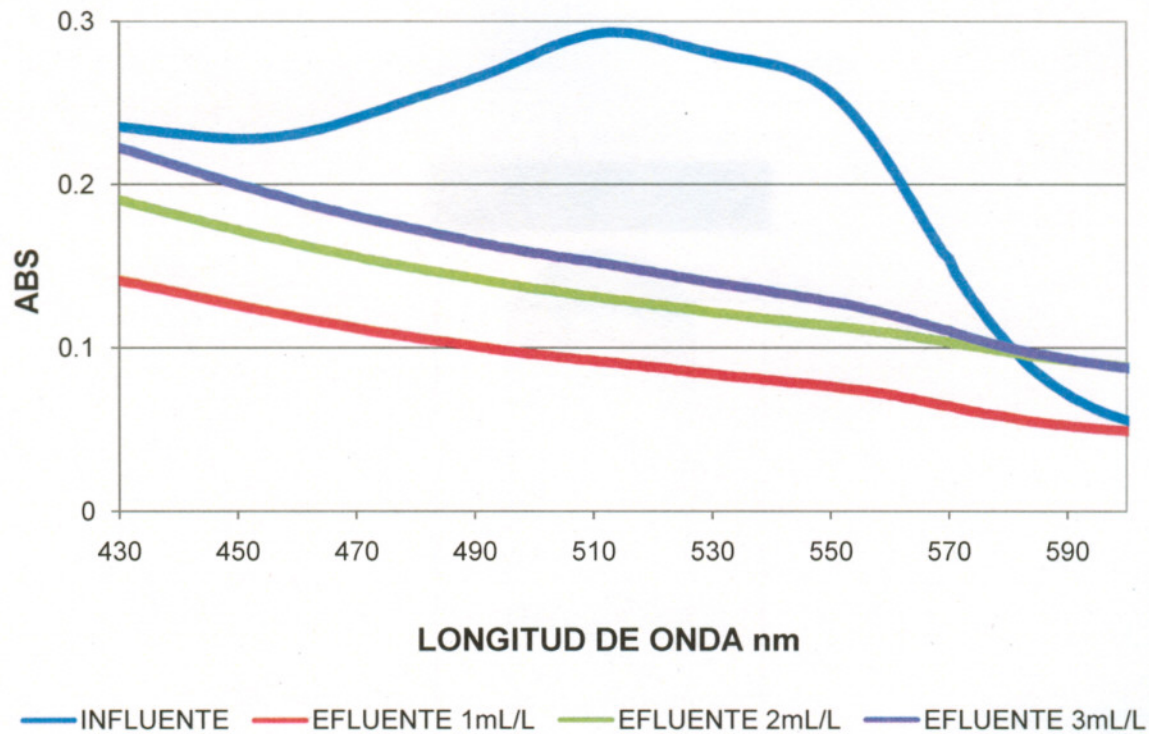
8.1.2 Pruebas preliminares de oxidación avanzada

Posterior a la caracterización se realizaron pruebas preliminares de tratabilidad con los procesos de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido y foto-Fenton con la finalidad de determinar si estos procesos eran adecuados para la degradación de las moléculas de colorante contenidas en la muestra de agua real.

8.1.2.1 Fotólisis de peróxido

El primer proceso probado para la degradación de las moléculas de colorante en una muestra de agua real fue el de fotólisis de peróxido donde se utilizaron altas dosis de peróxido de hidrógeno 50% P/V (1, 2 y 3 mL/L) lo que sirvió como un punto de partida para la determinación de las dosis óptimas. La degradación de las moléculas de colorante fue observada a partir de los primeros 30 min visualmente y en los barridos espectrofotométricos (Gráfica 2) que fueron realizados a los 60 min de iniciado el proceso. La disminución de la absorbancia entre las longitudes de onda correspondientes de los colorantes (450 – 490 nm) se interpreta como una degradación de las moléculas de colorante, ya que éstas al ser degradadas cambian su estructura molecular y por lo tanto la longitud de onda de máxima absorbancia.

En este proceso se pudo observar que la dosis que ofreció el resultado adecuado fue la de 1 mL/L ya que a dosis mayores la degradación de los colorantes se ve reducida, este resultado ha sido explicado en la literatura por reacciones competitivas en la generación de radicales $\text{OH}\cdot$ durante la etapa de radiación de la solución para la regeneración de estos radicales (Doménech *et al.*, 2001), por esta razón se determinó que para pruebas posteriores se emplearan dosis menores a 1 mL/L de peróxido de hidrógeno 50% P/V.



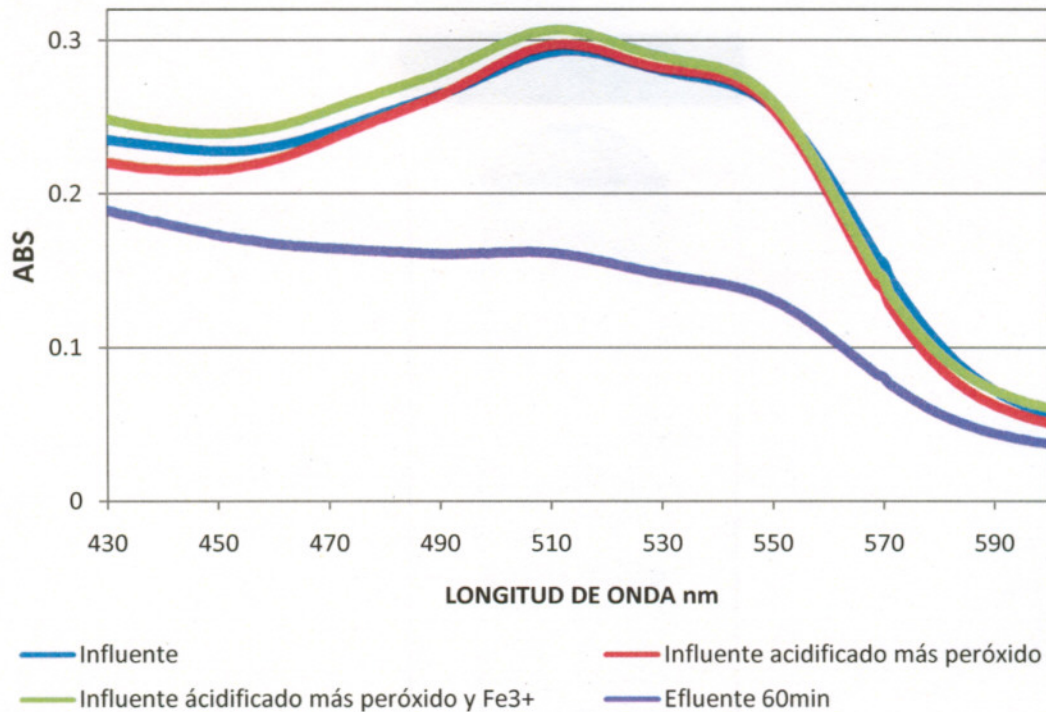
Gráfica 2 Degradación de las moléculas de colorante mediante el proceso de fotólisis de peróxido, comparación de 3 dosis después de 60min de exposición.

8.1.2.2 Foto-Fenton

El segundo proceso de oxidación avanzada probado para la degradación de las moléculas de colorante fue foto-Fenton. Para esta prueba se utilizó la dosis más baja de peróxido de hidrógeno utilizada en el proceso de fotólisis de peróxido, de 1 mL/L de peróxido de hidrógeno 50% P/V, ya que resultó ser la dosis más efectiva para la remoción de color y 0.4 g/L de FeCl_3 , como fuente de Fe^{3+} .

En este proceso la degradación de las moléculas de colorante fue menor con respecto a la fotólisis de peróxido (Gráfica 3), ya que la diferencia en absorbancias a la máxima longitud de onda fue menor en el proceso de foto-Fenton respecto de la fotólisis de peróxido, en el mismo tiempo de reacción que fue de 60min. Sin embargo, se observó que una vez que se adicionó el cloruro férrico, la absorbancia máxima aumentó lo que implica que se tiene una interferencia, la cual incrementa el valor de absorbancia en el

rango de lectura, no obstante, aun así la diferencia en la degradación de las moléculas de color se observa mayor en el proceso de fotólisis de peróxido.



Grafica 3 Primera prueba de foto-Fenton para la degradación de las moléculas de colorante a una dosis de 1 mL/L de H₂O₂ y 0.4 g/L de FeCl₃

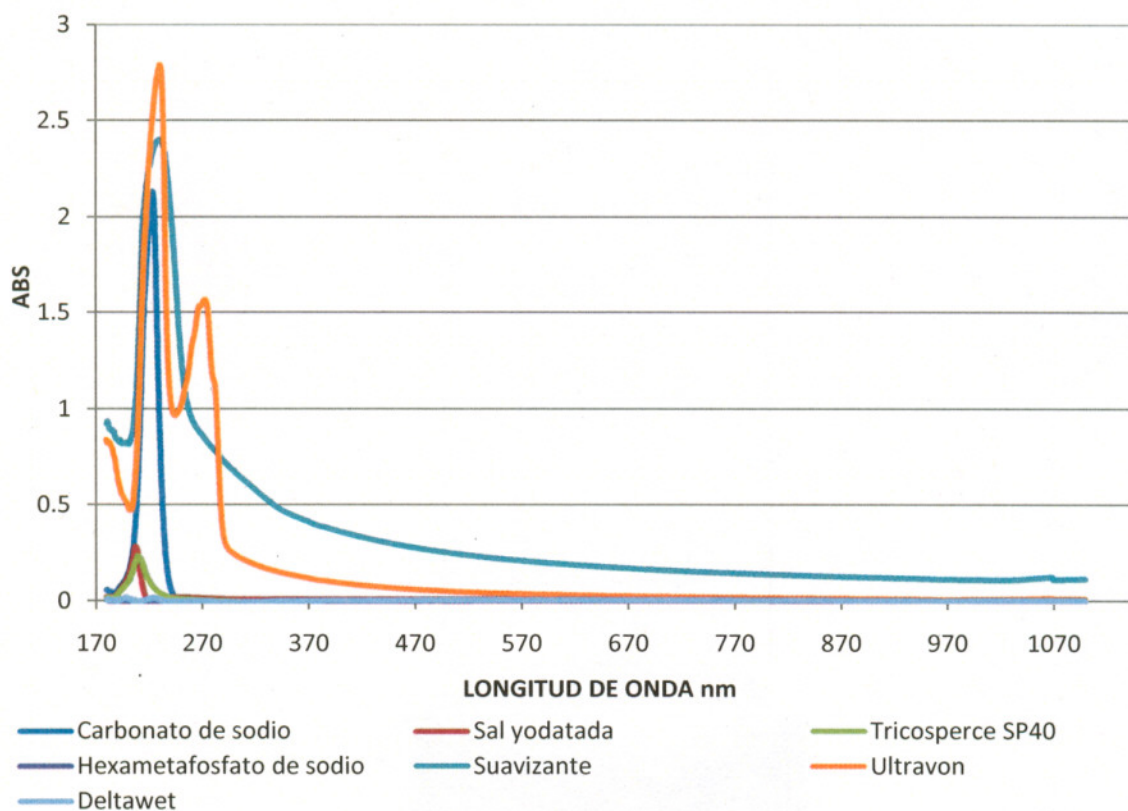
Fe³⁺ Los resultados obtenidos con estas pruebas de oxidación avanzada fueron determinantes para el desarrollo experimental, ya que a partir de las concentraciones mínimas utilizadas se buscaron las dosis óptimas de reactivos y tiempos mínimos de reacción para la degradación de las moléculas de color.

8.2 Elaboración del efluente sintético

El efluente sintético se preparó como se describe en el capítulo 7.3. Debido a que durante el proceso de teñido se agregan 7 aditivos, se realizaron barridos espectrofotométricos individuales de las soluciones de cada uno de estos reactivos químicos (a la concentración de proceso), con la finalidad de determinar la influencia de los aditivos en la absorbancia de la mezcla con los colorantes (Gráfica 4).

Se puede observar que los picos de estos barridos espectrofotométricos corresponden a los observados en la muestra de agua real mostrada en la gráfica 1 a los 225 y 277 nm, con lo cual se confirma que estas máximas absorbancias no corresponden a los colorantes.

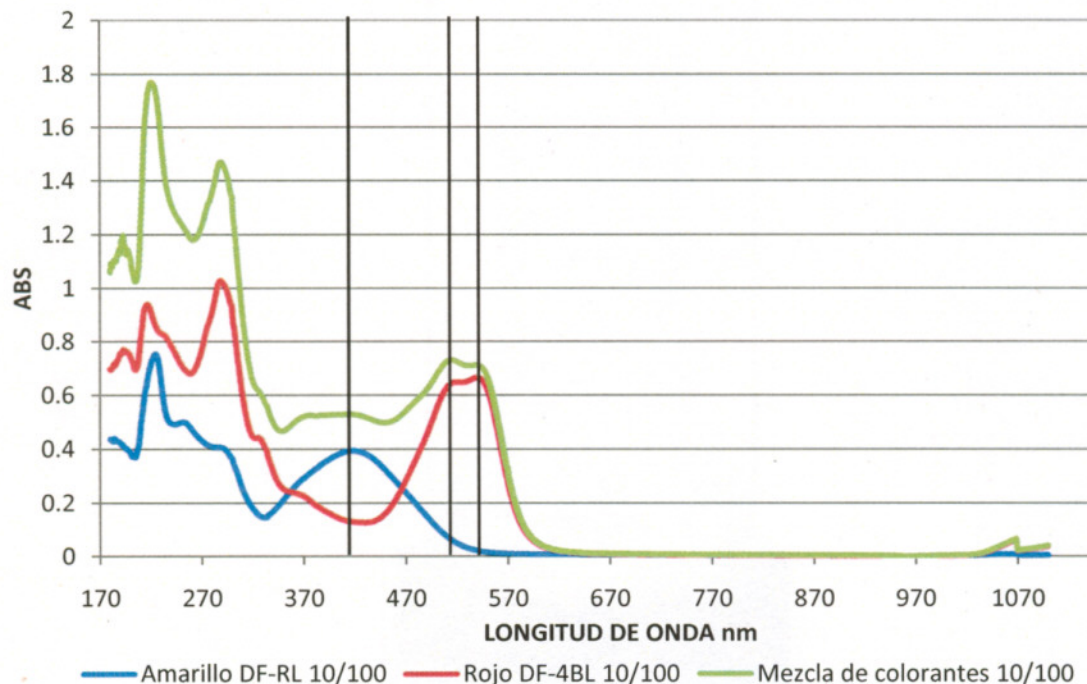
Por otra parte, a la longitud de 517 nm se observa que hay una influencia de algunos aditivos como son el suavizante y el ultravon TPM, por lo que a esta longitud, la absorbancia de los colorantes tiene cierta influencia.



Gráfica 4 Barridos individuales de los reactivos utilizados en el proceso de teñido de Textiles Mont Blanc

Por otra parte, se realizaron también los barridos espectrofotométricos de los colorantes para corroborar que la máxima absorbancia determinada en la muestra de agua real correspondiera a la mezcla de los colorantes únicamente y no estuviera influenciada por algún componente diferente a los colorantes y a los aditivos del proceso de teñido. Las concentraciones utilizadas para estos barridos fueron las de entrada a proceso de teñido que son de 1.302 g/L de colorante Rojo Triactive DF-4BL y de 0.948 g/L de

colorante Amarillo Triactive DF-RL. En este barrido inicial, los valores de absorbancia se salen del rango de medición del equipo, por lo que se utilizó una dilución de 10/100 de estas soluciones y se volvió a realizar el barrido (Gráfica 5). Se puede observar como los picos de mayor absorbancia son localizados como sigue: a los 418 nm el amarillo y a los 540 nm el rojo, y finalmente la mezcla de los colorantes está localizada a los 517 nm. El espectro de los colorantes y la mezcla de ellos también presenta respuesta en el rango ultravioleta que es parte de las estructuras moleculares de los colorantes, sin embargo, normalmente los colorantes se leen en el espectro visible ya que el espectro de referencia de las moléculas de color está precisamente en el área visible del espectro.

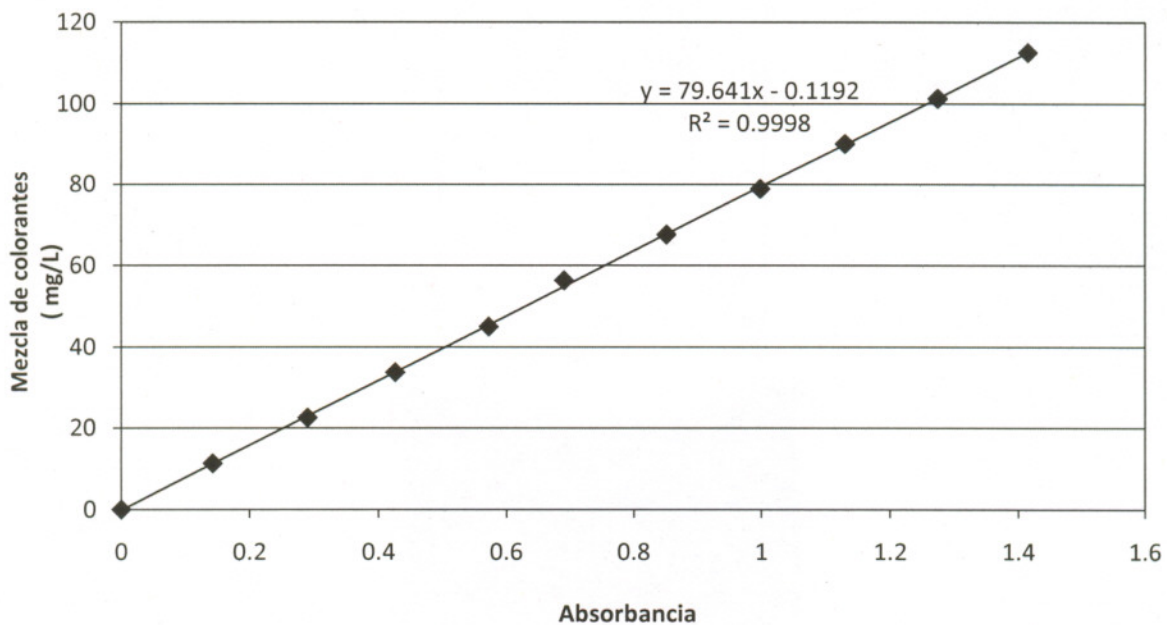


Gráfica 5 Barridos de los colorantes utilizados en el proceso de teñido del caso de estudio

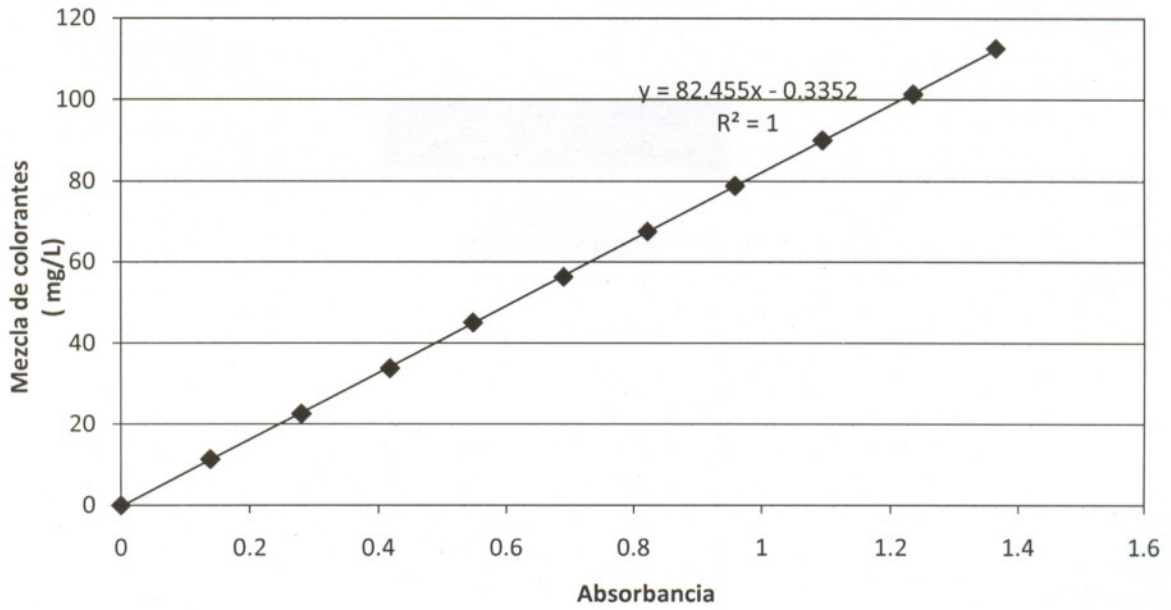
Este barrido espectrofotométrico sirvió además para verificar que el barrido de la mezcla de los colorantes no está influenciado por otras sustancias diferentes a los colorantes y a los aditivos, ya que al hacer el comparativo con el barrido de la muestra real no se observan interferencias diferentes o picos de absorbancias que modifiquen el espectro del efluente, tanto del sintético, como del real.

8.2.1 Curvas de calibración para la medición de la concentración de la mezcla de los colorantes

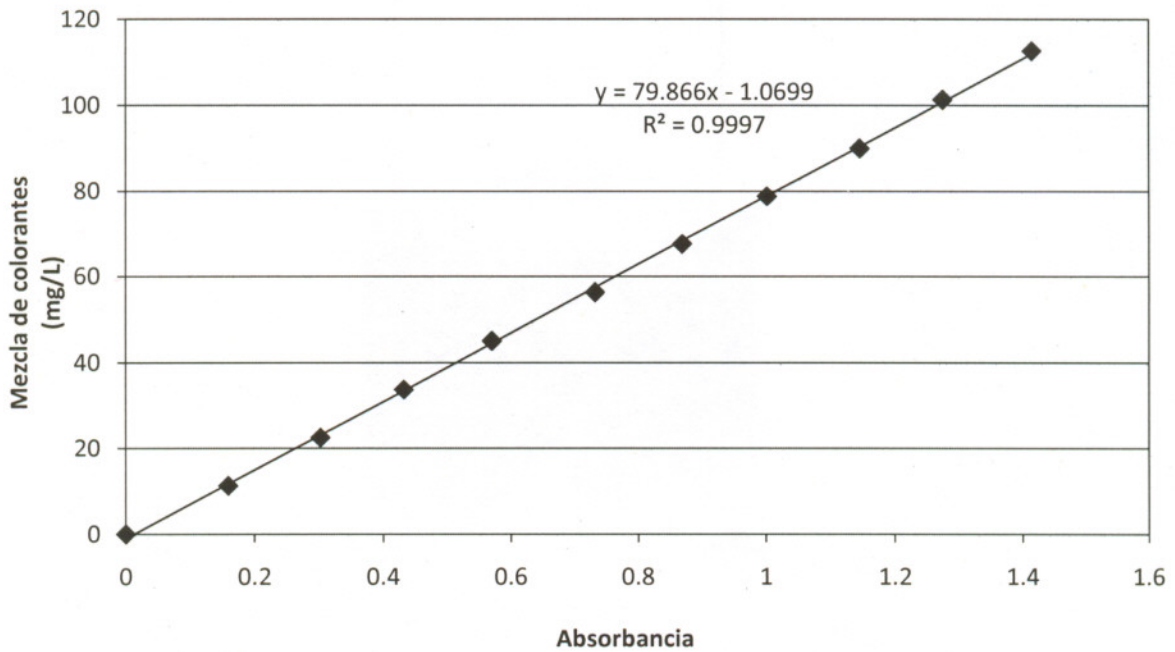
Para determinar la remoción de las moléculas de colorante durante los procesos de tratamiento, se trazaron curvas de calibración de la mezcla de colorantes con y sin aditivos y de cada uno de los colorantes por separado, para las cuales se partió de una solución madre de colorantes a partir de las concentraciones máximas de cada uno de los reactivos como se indica en el capítulo 7.3. Estas curvas fueron trazadas a diferentes pH: pH de 10.7 (muestra con aditivos), pH de 3 (entrada a oxidación) y pH de 7 (entrada a biofiltro) (Gráficas 6 a la 10). Esto debido a que con la variación de esta condición la respuesta en la absorbancia se ve modificada con excepción de la mezcla de colorantes sin aditivos cuyo pH de la mezcla es de 7.4, por lo cual sólo hubo necesidad de trazar las curvas a este pH y a pH de 3.



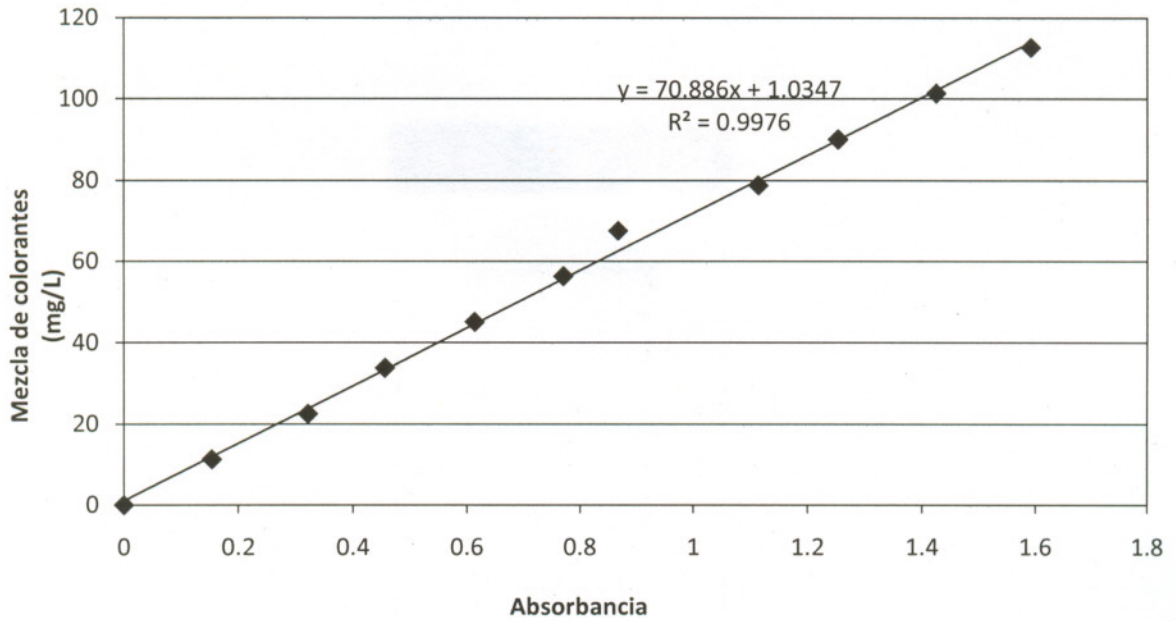
Gráfica 6 Curva de calibración de colorantes con aditivos pH 10.7, $\lambda=517nm$



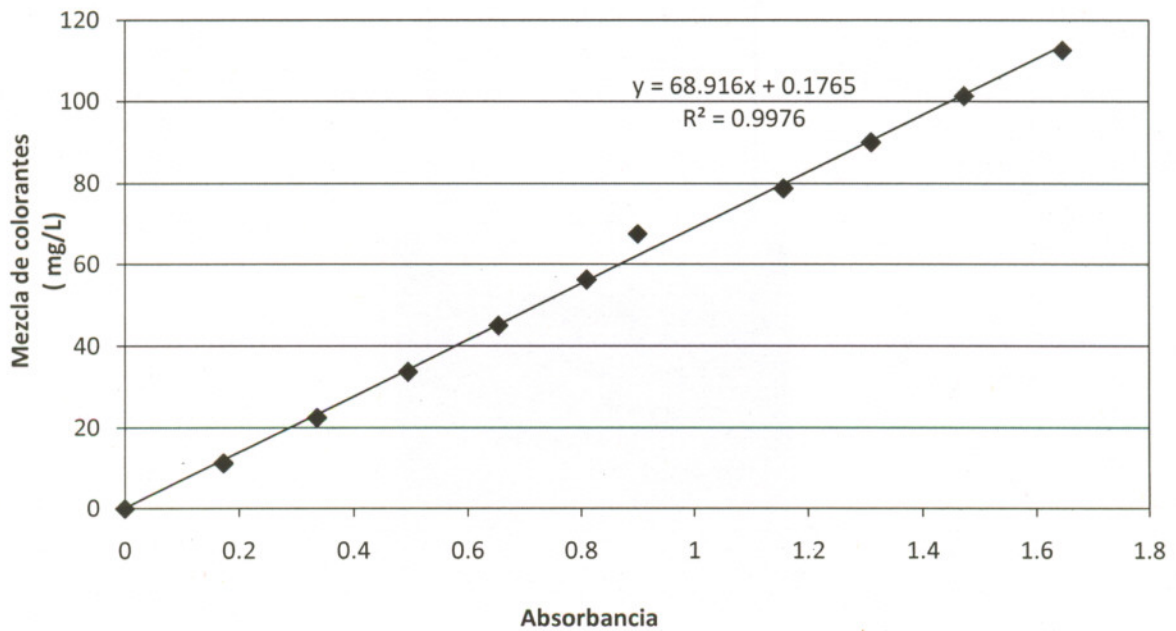
Gráfica 7 Curva de calibración de colorantes con aditivos pH 3, $\lambda=517nm$



Gráfica 8 Curva de calibración de colorantes con aditivos pH 7, $\lambda=517nm$



Gráfica 9 Curva de calibración de colorantes sin aditivos pH 7.4, $\lambda=515\text{nm}$



Gráfica 10 Curva de colorantes sin aditivos pH 3, $\lambda=515\text{nm}$

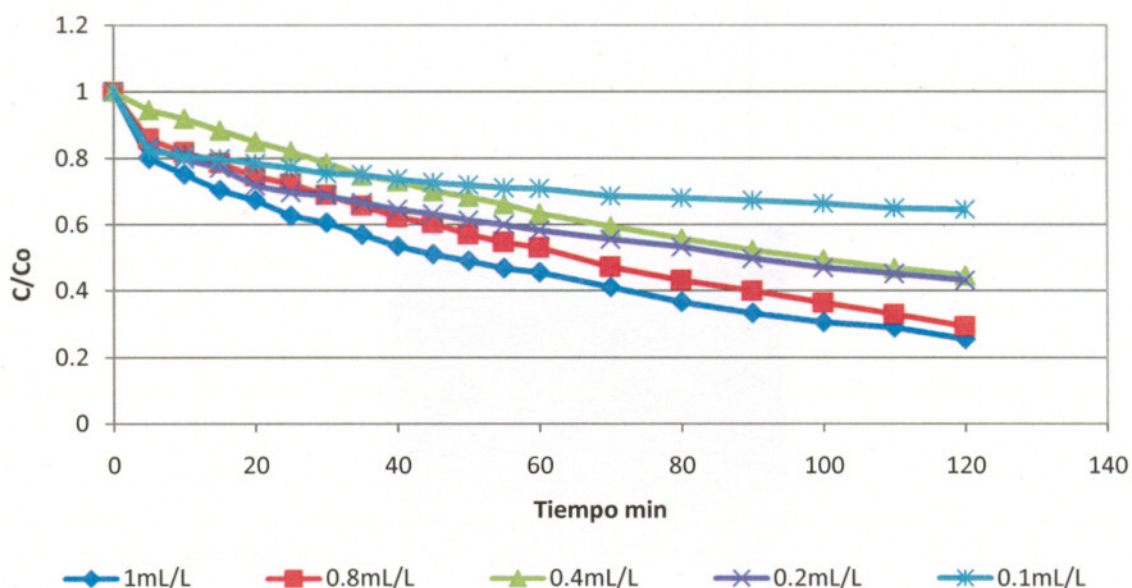
8.3 Pruebas experimentales con agua residual sintética

8.3.1 Selección del proceso de oxidación avanzada y determinación de dosis óptimas

A partir de las curvas de calibración se pudo medir la remoción de colorantes durante los procesos de fotólisis y foto-Fenton y para la selección del proceso de oxidación se realizaron corridas con cada uno de ellos, como se describió en el capítulo 7.4.

8.3.1.1 Fotólisis de peróxido

En el proceso de fotólisis de peróxido se observaron remociones de las moléculas de colorante de entre 30 al 50% en la primera hora de tratamiento según la dosis utilizada en el proceso de tratamiento (Gráfica 11). Así mismo, se observó que en el caso de la dosis de 1 mL/L de peróxido, era posible alcanzar remociones de las moléculas de colorante hasta de 100%, sin embargo, para lograrlo se requirieron tiempos de reacción por encima de las 6 h, condiciones que son técnica y económicamente no viables.

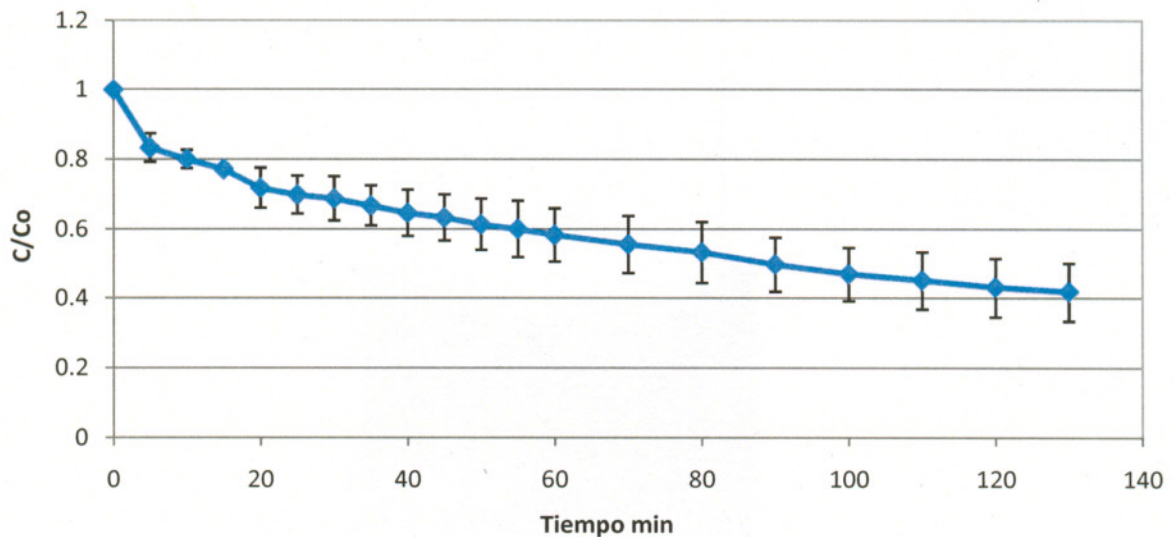


Gráfica 11 Comparación de la degradación de la mezcla de colorantes a diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno.

Por otra parte, al encontrarse que con la menor de las dosis planteadas en la metodología que fue de 0.2 mL/L de H₂O₂, se alcanzó una remoción del 42% en la primer hora de reacción, y de hasta el 60% con un tiempo de 2 h, se corrió una prueba adicional con una concentración de 0.1 mL/L, donde se alcanzaron remociones cercanas al 30% con 1 h de tiempo de reacción, y de hasta 35% con un tiempo de 2 h.

Por esta razón, se preseleccionó la dosis de 0.2 mL/L de peróxido de hidrógeno con un tiempo de reacción de 100 min, para alcanzar una remoción aproximada del 50% de las moléculas de colorante.

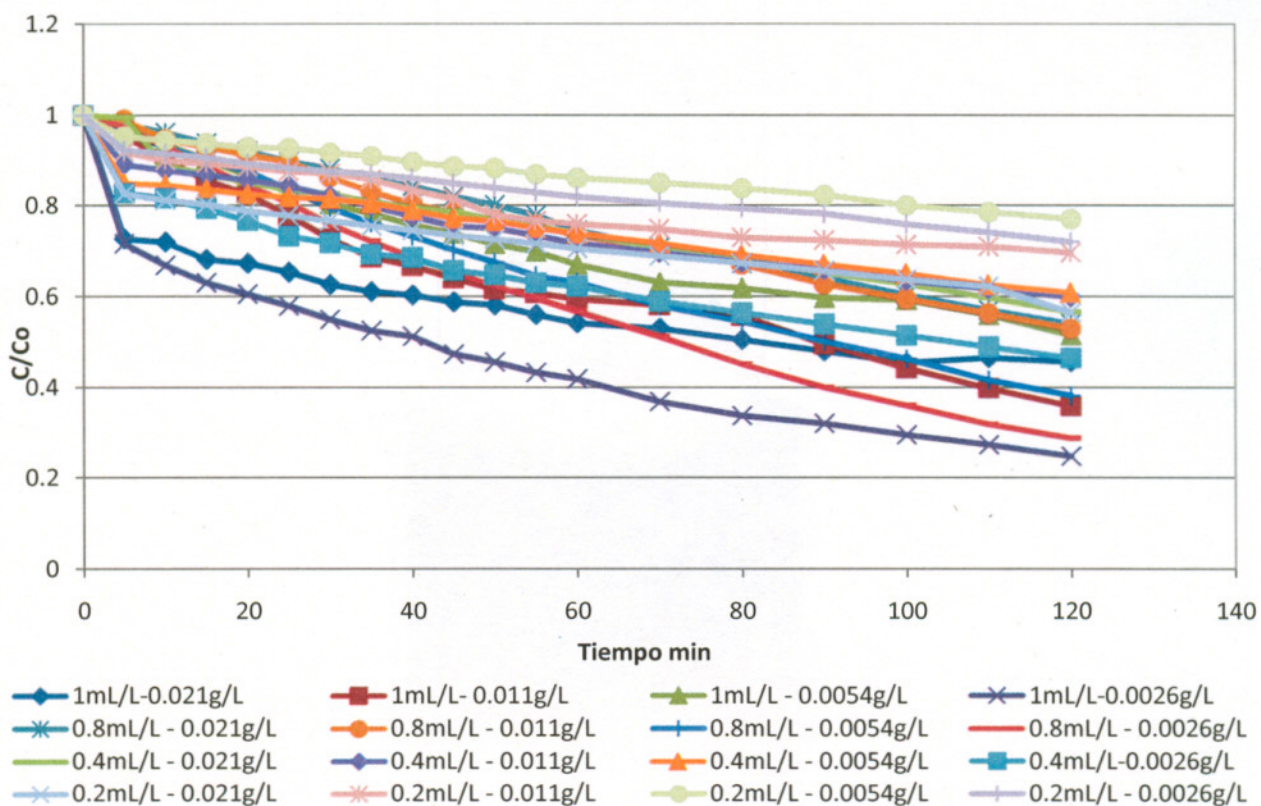
Dados estos resultados y con la finalidad de verificar la repetibilidad de la prueba se realizaron 3 repeticiones utilizando la dosis preseleccionada de 0.2 mL/L de peróxido de hidrógeno, llevando la reacción hasta 120 min de tratamiento. Los resultados obtenidos fueron muy similares entre sí, alcanzando una remoción promedio de 60% con una desviación estándar promedio de 6%, como se muestra en la grafica 12.



Gráfica 12 Degradación de las moléculas de colorante mediante el proceso de fotólisis de peróxido con una dosis de 0.2 mL/L de peróxido de hidrógeno

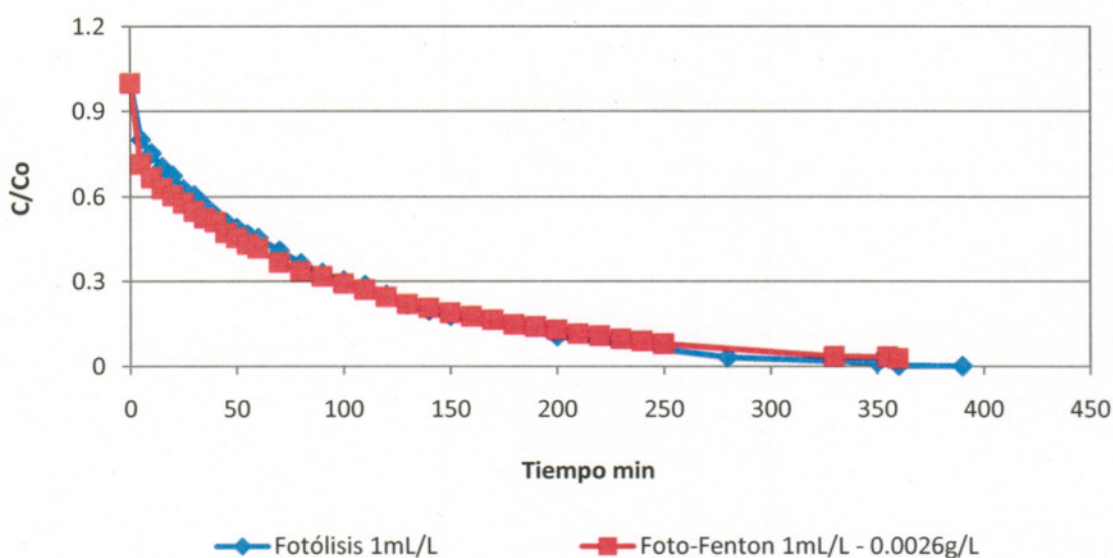
8.3.1.2 Foto-Fenton

En el caso del proceso de foto-Fenton, los resultados encontrados respecto a la degradación de las moléculas de colorante, tuvieron un comportamiento similar al obtenido a la fotólisis de peróxido. Como se puede observar en la gráfica 13 la mejor eficiencia se obtiene con una combinación de 1 mL/L de H₂O₂ y 0.0026 g/L de Fe²⁺, alcanzando una remoción del 75% de las moléculas de colorante en un tiempo de reacción de 2 h, la cual es comparable con la condición de fotólisis de peróxido donde la concentración de este reactivo fue de 1 mL/L. Por otra parte, se encontró que el proceso de foto-Fenton tuvo mayores eficiencias cuando se utilizaron las combinaciones con la concentración de 0.0026 g/L de Fe²⁺, ya que con las concentraciones más altas la eficiencia alcanzó una reducción de hasta 35% en el caso de las combinaciones con 0.8 mL/L de peróxido con la excepción de las combinaciones con 0.2 mL/L donde la mejor remoción fue lograda con la combinación con 0.021 g/L.



Gráfica 13 Degradación de las moléculas de colorante mediante el proceso de foto-Fenton a diferentes concentraciones (mL/L de H₂O₂ – g/L de Fe²⁺)

Así mismo, se puede observar que con ninguna de las combinaciones con 0.2 mL/L de peróxido se alcanzaron las remociones logradas con la fotólisis de peróxido utilizando la misma dosis, sin embargo, también se encontró que dándole un seguimiento a la reacción superior a las 6 h, es posible alcanzar una remoción del 100% de las moléculas de colorante con la dosificación de 1 mL/L de peróxido y 0.0026 g/L de Fe^{2+} , tal y como fue para la fotólisis de peróxido con una dosis de 1 mL/L (Gráfica 14).



Gráfica 14 Comparación de la degradación al 100% de las moléculas de colorante mediante los procesos de fotólisis de peróxido y foto-Fenton.

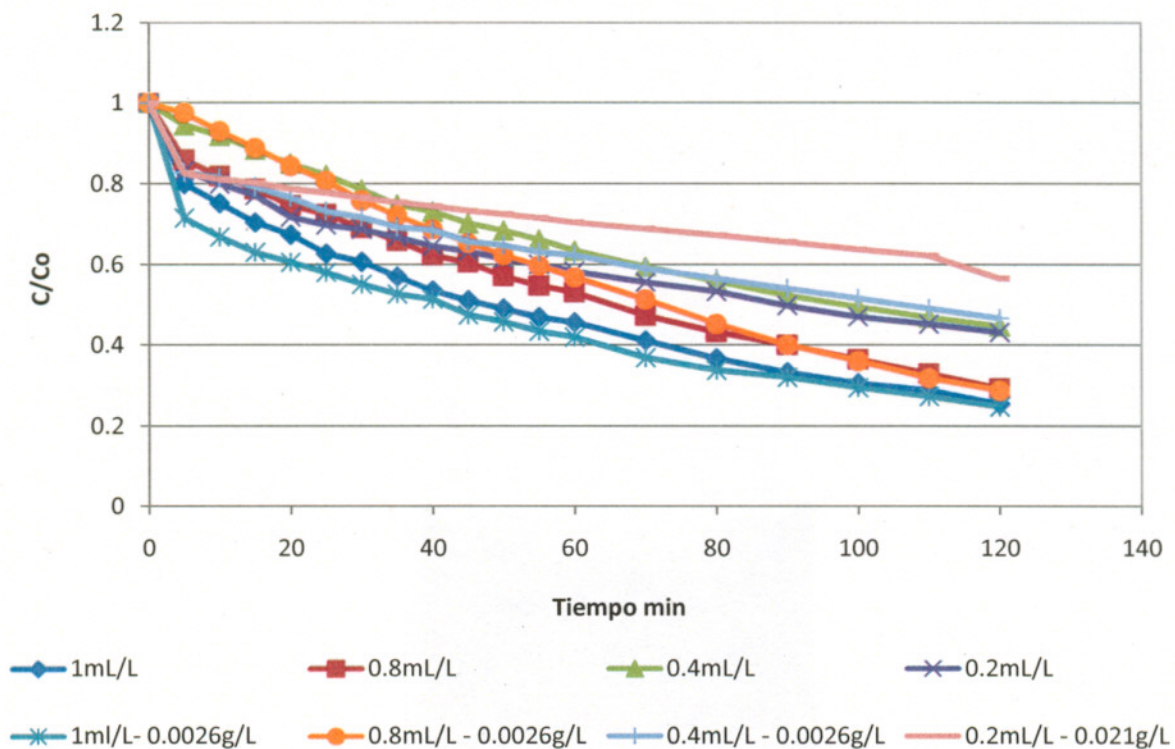
Sin embargo, la viabilidad económica de estos procesos para alcanzar estas remociones es nula, debido principalmente a los costos energéticos y de reactivos para ambos casos.

8.3.1.3 Selección del proceso de oxidación avanzada

Una vez realizadas las pruebas de fotólisis de peróxido y de foto-Fenton se seleccionó a la fotólisis de peróxido como el proceso más adecuado para la fase de pretratamiento del agua residual sintética de la industria textil, ya que el objetivo es degradar el 50% de las moléculas de colorante en esta etapa de pretratamiento lo cual se alcanza en

ambos procesos, sin embargo, en el proceso de foto-Fenton es necesario utilizar 1 mL/L de peróxido y 0.0026 g/L de Fe^{2+} para lograr el 50% de degradación en la primera hora de reacción y de al menos 0.4 mL/L de peróxido y 0.0026 g/L de Fe^{2+} con 2 h de tiempo de reacción para llegar a una degradación del 50% de las moléculas de color, mientras que con la fotólisis de peróxido es necesario utilizar al menos 0.8 mL/L de peróxido en la primera hora y 0.2 mL/L para que en un tiempo de 2 h se degrade el 50% de las moléculas de los colorantes.

En la gráfica 15 se muestra un comparativo entre ambos procesos de oxidación, para el caso de fotólisis se graficaron las cuatro dosis utilizadas y para foto-Fenton se graficó la combinación más eficiente por cada dosis de peróxido utilizada.



Gráfica 15 Degradación de las moléculas de color mediante los procesos de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido y foto-Fenton.

Con base en estos resultados se establece que la etapa de pretratamiento consiste en una oxidación avanzada tipo fotólisis de peróxido con una dosis de 0.2 mL/L de

peróxido de hidrógeno a un tiempo de reacción de 2 h para alcanzar una remoción de la mezcla de colorantes de 50%.

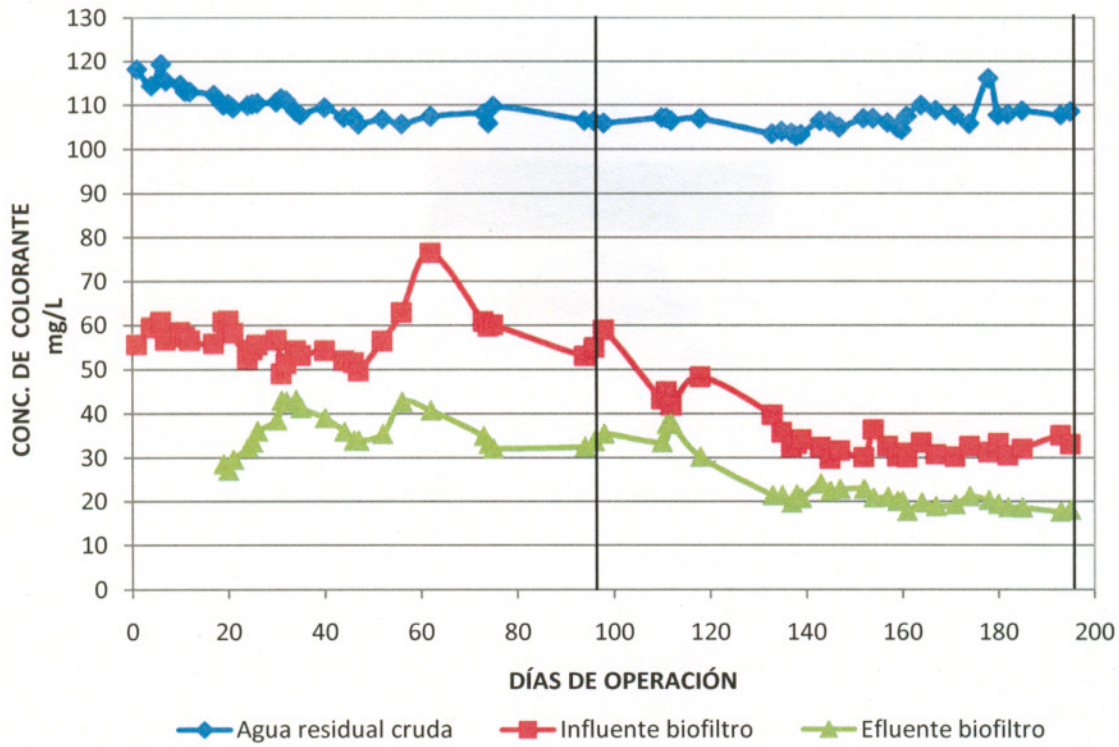
8.4 Eficiencia del sistema acoplado

Una vez que se determinaron la dosis óptima y el tiempo mínimo de reacción para alcanzar un 50% de remoción de la mezcla de colorantes y ya que se habían montado los biofiltros como se describió en el apartado 7.5, se procedió al acoplamiento del proceso de oxidación al proceso biológico.

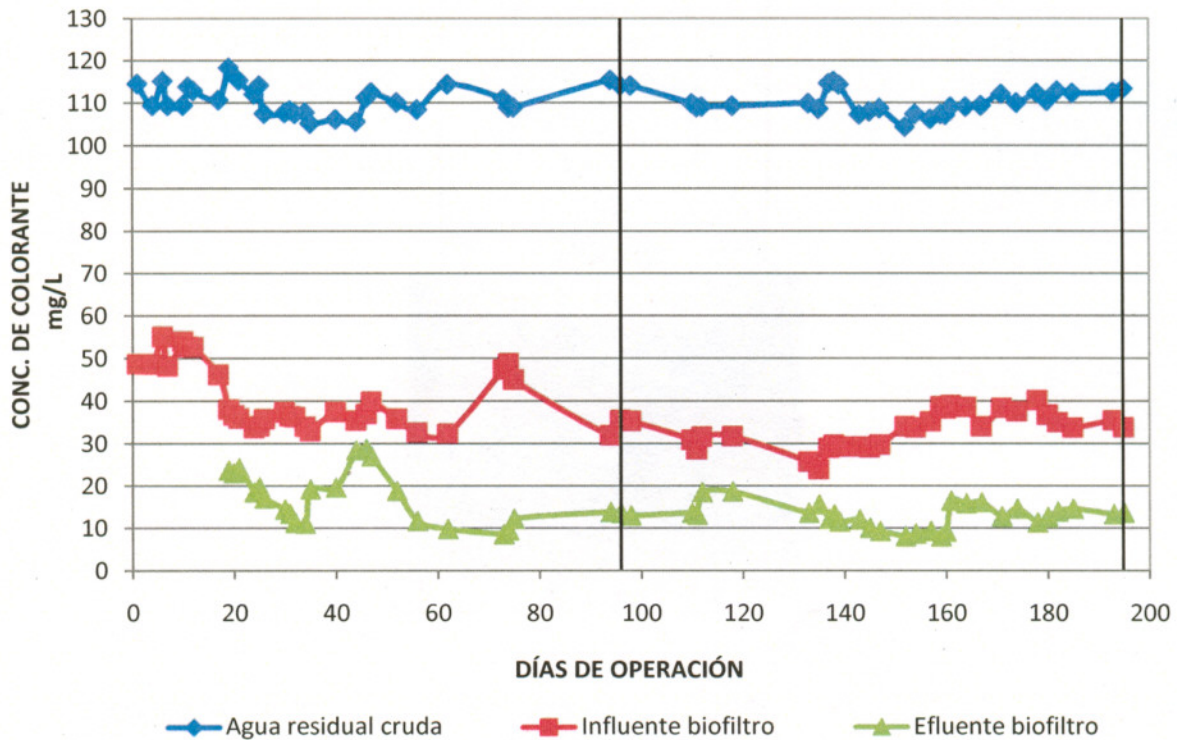
Como ya se describió en la metodología, el tren de tratamiento (fotólisis de peróxido más biofiltración aerobia sobre cama orgánica) fue probado aplicando agua residual sintética con aditivos y sin aditivos, con la finalidad de conocer su efecto sobre la remoción de los colorantes y la toxicidad generada por los metabolitos secundarios en el proceso biológico de biofiltración aerobia sobre cama orgánica.

8.4.1 Remoción de las moléculas de colorante en el proceso acoplado

En la gráfica 16 se observa que la remoción de las moléculas de colorante en el proceso de fotólisis fue en promedio de $48\% \pm 6\%$ entre los días 20 y 100 en que el sistema se operó bajo las condiciones ya descritas en la metodología. Adicionalmente, en el proceso biológico la remoción promedio de las moléculas de colorante llegó a $67\% \pm 4\%$. Por otra parte, en el caso del tren de tratamiento sin aditivos, la remoción promedio de las moléculas de colorante en la fotólisis fue de $67\% \pm 4\%$ entre los días 20 y 100 de operación, y en el sistema biológico la remoción aumenta en promedio a $85\% \pm 6\%$ (ver gráfica 17). Cabe mencionar que el proceso de oxidación requiere de 2 h para remover el color en aproximadamente 50% en el caso del agua con los aditivos, mientras que para el agua sintética que contiene únicamente los colorantes el tiempo de reacción fue de 1 h, lo cual indica que el uso de los aditivos para la fijación de colorante durante el proceso de teñido inhibe la remoción de los colorantes tanto en el proceso de oxidación como en el proceso biológico.



Gráfica 16. Degradación de colorantes en el proceso de tratamiento con aditivos



Gráfica 17 Degradación de colorantes en el proceso de tratamiento sin aditivos

Esta diferencia de remociones de las moléculas de colorante se debe en el caso del proceso de oxidación avanzada principalmente a que el peróxido oxida primero las moléculas de los aditivos cuya estructura es más sencilla y posteriormente se oxidan las moléculas de los colorantes.

La variabilidad observada entre los días 40 y 50 es debida principalmente a efectos de operación, ya que durante este periodo se tuvo una obstrucción en la tubería de alimentación al biofiltro provocando una ligera desestabilización del proceso, sin embargo, en un periodo de aproximadamente 10 días el sistema logra volver a su condición de operación normal, indicativo de la capacidad de los biofiltros para adaptarse a la variabilidad de las condiciones de trabajo.

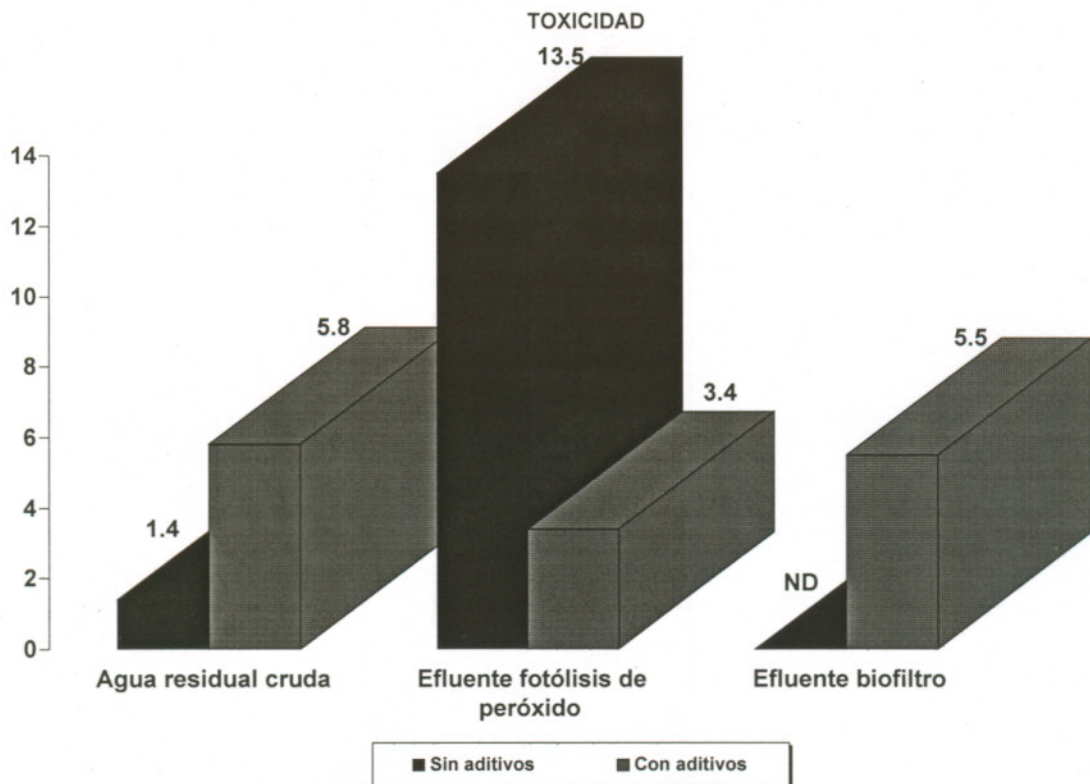
8.4.2 Toxicidad

Como ha sido mencionado con anterioridad, los reactores biológicos operaron de forma estable del día 40 en adelante, por lo que el día 94 se realizó un muestreo para la determinación del comportamiento de la toxicidad en el proceso de tratamiento. Las pruebas se realizaron mediante la técnica de *Selenastrum capricornutum* que es un alga de agua dulce, cuya respuesta, se ha visto que no está afectada por altas conductividades. Por otra parte, en estudios previos, se demostró que presenta sensibilidad a los compuestos orgánicos aromáticos y volátiles (Ramírez *et al.*, 2005), motivo por el cual se determinó que ésta era la opción adecuada para verificar el comportamiento de la toxicidad del agua con colorantes, con y sin aditivos.

Los resultados obtenidos (Tabla 5) revelan importantes datos como es que la toxicidad del efluente de la industria textil está influenciada por la adición de los aditivos utilizados para la fijación de los colorantes ya que la toxicidad del agua sintética con colorantes y aditivos es 4.2 veces mayor respecto del agua sintética con colorantes sin aditivos, (Gráfica 18).

Tabla 5- Comportamiento de la toxicidad en los procesos combinados día 94.

MUESTRA	UT	
	Sin aditivos	Con aditivos
Agua residual cruda	1.4	5.8
Efluente fotólisis de peróxido	13.5	3.4
Efluente biofiltro	ND	5.5



Gráfica 18 Comportamiento de la toxicidad en el proceso acoplado de tratamiento (Día 94)

Por otra parte se puede inferir que durante el proceso de oxidación avanzada las moléculas que se oxidan o en su caso se degradan inicialmente son los aditivos, motivo por el cual la toxicidad es reducida. Mientras que las moléculas de colorante serían poco oxidadas, lo cual es apreciable con los resultados de remoción de la mezcla de colorantes. Una vez que esta agua es introducida al proceso de biofiltración, se presenta la degradación de los remanentes de los colorantes a través de la ruptura de los enlaces azo por mecanismos biológicos, con lo cual se asume que la generación de metabolitos secundarios se incrementa. Al observar la estructura química de los

colorantes azo, se puede asumir que se generan moléculas que representan las unidades base de construcción de ambos colorantes (polímeros formados por grupos amino, sulfónico, difenilos mono y disustituidos y anillos triacénicos halogenados; ver figuras 1 a la 3). Todas estas moléculas forman metabolitos secundarios como las aminas y cloraminas las cuales generan el incremento de la toxicidad en el efluente del biofiltro.

Con respecto al proceso de tratamiento del agua sintética con colorantes sin aditivos del proceso de teñido, el comportamiento es completamente diferente, ya que las dos etapas de tratamiento demuestran tener mejor capacidad de degradación de los colorantes, y de acuerdo con lo que se ha descrito en la literatura es apreciable que la toxicidad aportada por los colorantes es muy baja, sin embargo, cuando estas moléculas comienzan a ser degradadas se forman otras de menor tamaño que potencializan la toxicidad. Hay mayor ruptura de moléculas de colorante durante el proceso de fotólisis, y por lo tanto, la remoción de colorante es mayor, pero también lo es la generación de subproductos tóxicos, por lo que en este caso es 10 veces la toxicidad inicial, sin embargo, el proceso de biofiltración demostró ser capaz de culminar el proceso de degradación de las moléculas de color y también de eliminar toda la toxicidad generada en el proceso de oxidación avanzada (Tabla 6 y gráfica 18).

Tomando en cuenta el comportamiento de la toxicidad mostrado en la tabla 6, se planteó una nueva hipótesis la cual plantea que si se aumenta la dosis de peróxido y el tiempo de reacción del proceso de fotólisis de peróxido, se degradarán los aditivos y se aumentará también la degradación de las moléculas de color con lo que se propiciara el aumento de la toxicidad por la formación de los metabolitos secundarios. Posteriormente estos metabolitos, así como las moléculas remanentes de color, podrán ser degradados en el proceso de biofiltración aerobia con lo que se eliminaría la toxicidad en el efluente tratado. Por esta razón, a partir del día 100 se procedió a degradar en mayor cantidad las moléculas de color con una dosis de 0.8 mL/L de peróxido de hidrógeno y un tiempo de reacción de 2.5 h en el proceso de oxidación avanzada con la finalidad de alcanzar un 70% de degradación de las moléculas de color y poder obtener resultados similares de remoción de toxicidad alcanzados en el

proceso de tratamiento de agua sintética sin aditivos. En la tabla 7, se muestra un resumen de la degradación de las moléculas de color durante los días 100 al 196 de operación, durante los cuales, la degradación de las moléculas de color contenidas en el agua sintética con aditivos en el proceso acoplado se tuvo en promedio de $80\% \pm 6\%$ y en el proceso de tratamiento de agua sintética sin aditivos se tuvieron remociones promedio de las moléculas de color de $88\% \pm 3\%$; la estabilización del proceso de biofiltración aerobia sobre cama orgánica (alimentado con agua sintética con aditivos pretratada), se alcanzó entre los días 120 y 130 de operación, manteniéndose constante hasta la finalización del trabajo experimental. El biofiltro testigo se continuó operando bajo las mismas condiciones de operación por lo que no se observó variación en la degradación de las moléculas de color (Ver gráficas 16 y 17).

El proceso de tratamiento fue operado bajo estas condiciones descritas durante 90 días para permitir la estabilización del biofiltro. El día 196 se realizó un segundo muestreo para la determinación de la toxicidad en cada una de las etapas del proceso de tratamiento. En el caso del agua con colorantes y aditivos para verificar que alcanzaran niveles de remoción de toxicidad similares a los del proceso de tratamiento de agua sintética sin aditivos. A su vez para este sistema se determinó la toxicidad para verificar que el proceso de tratamiento de agua sintética sin aditivos continuara trabajando de manera similar a lo encontrado el día 94.

Tabla 6- Resumen del comportamiento de los procesos de tratamiento de agua sintética con y sin aditivos del día 100 al 196.

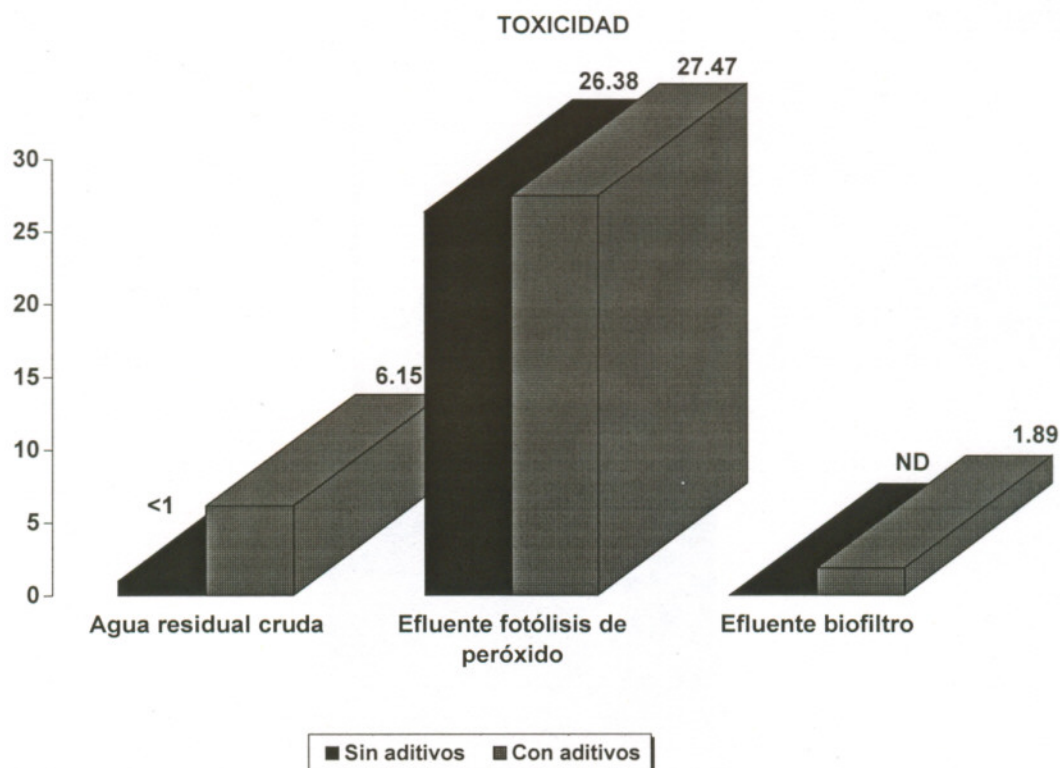
MUESTRA	Colorante (mg/L)	
	Con aditivos	Sin aditivos
Agua residual cruda	107 ± 3	110 ± 3
Efluente fotólisis de peróxido	34 ± 7	34 ± 4
Efluente biofiltro	21 ± 6	13 ± 3
% Remoción Total	80% ± 6%	88% ± 3%

De acuerdo con los resultados de toxicidad obtenidos del muestreo del día 196 (Tabla 7), se confirmó la hipótesis planteada, ya que como se observa en la gráfica 19

al aumentar al dosis de peróxido y el tiempo de exposición para tratar el agua residual sintética con aditivos, el color se redujo aproximadamente 70% y la toxicidad se aumentó más de cuatro veces en el proceso de oxidación ya que al oxidar en mayor cantidad las moléculas de color se generaron moléculas menos complejas pero más tóxicas. Posteriormente, estas moléculas fueron metabolizadas en el proceso de biofiltración aerobia con lo que se logró remover la toxicidad en un 93%.

Tabla 7- Comportamiento de la toxicidad en los procesos combinados día 196.

MUESTRA	UT	
	Sin aditivos	Con aditivos
Agua residual cruda	<1	6.15
Efluente fotólisis de peróxido	26.38	27.47
Efluente biofiltro	ND	1.89



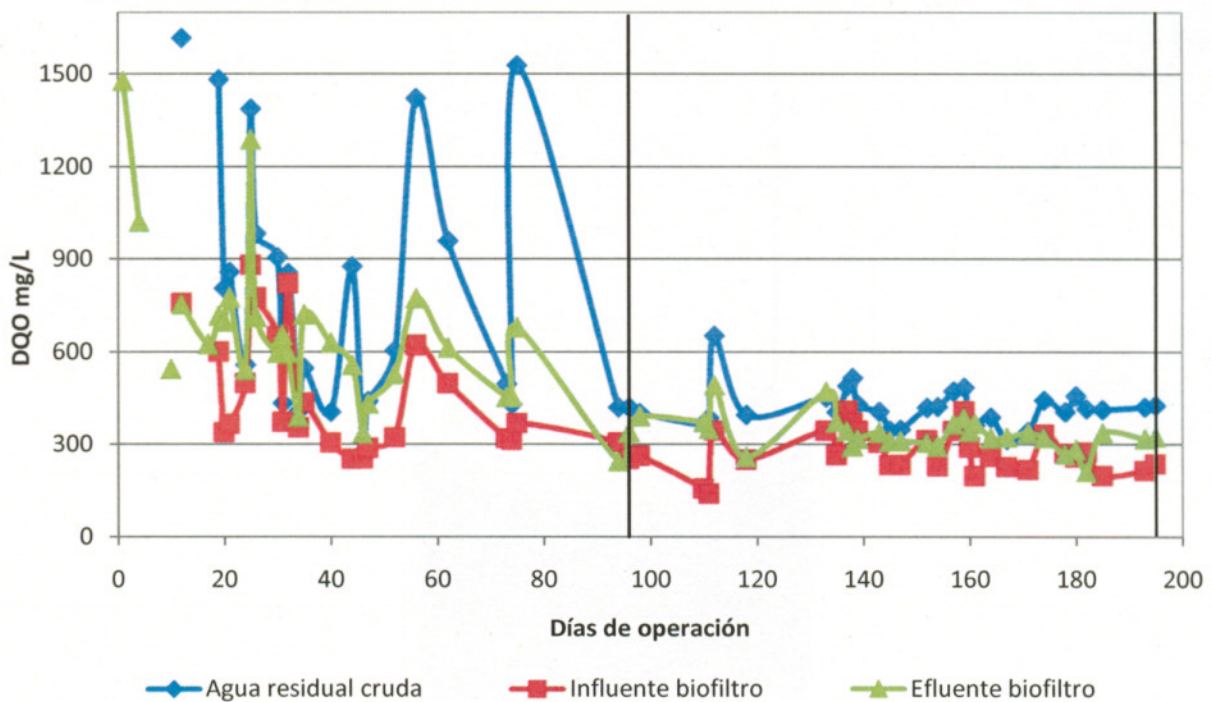
Gráfica 19 Comportamiento de la toxicidad en el proceso acoplado de tratamiento (Día 196)

Para el caso del proceso combinado de tratamiento de agua sintética con colorantes sin aditivos, el comportamiento del sistema se mantuvo constante ya que los resultados

obtenidos en este segundo muestreo son similares a los del día 94, lo que indica que el proceso de biofiltración aerobia sobre cama orgánica es capaz de eliminar la toxicidad de las moléculas intermedias que se forman de los colorantes al degradarse parcialmente en el proceso de oxidación avanzada.

8.4.3 Remoción de la DQO en el proceso acoplado

En el proceso de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido se hace una degradación parcial de las moléculas tanto de los colorantes como de los aditivos, lo cual se refleja en la remoción de la DQO (Gráfica 20). La remoción de la DQO es en promedio de 41% entre el día 40 y 100 de operación, es decir, únicamente el 41% de las moléculas oxidables, tanto de los colorantes, como de los aditivos son oxidadas, el resto es transformado en otras moléculas.



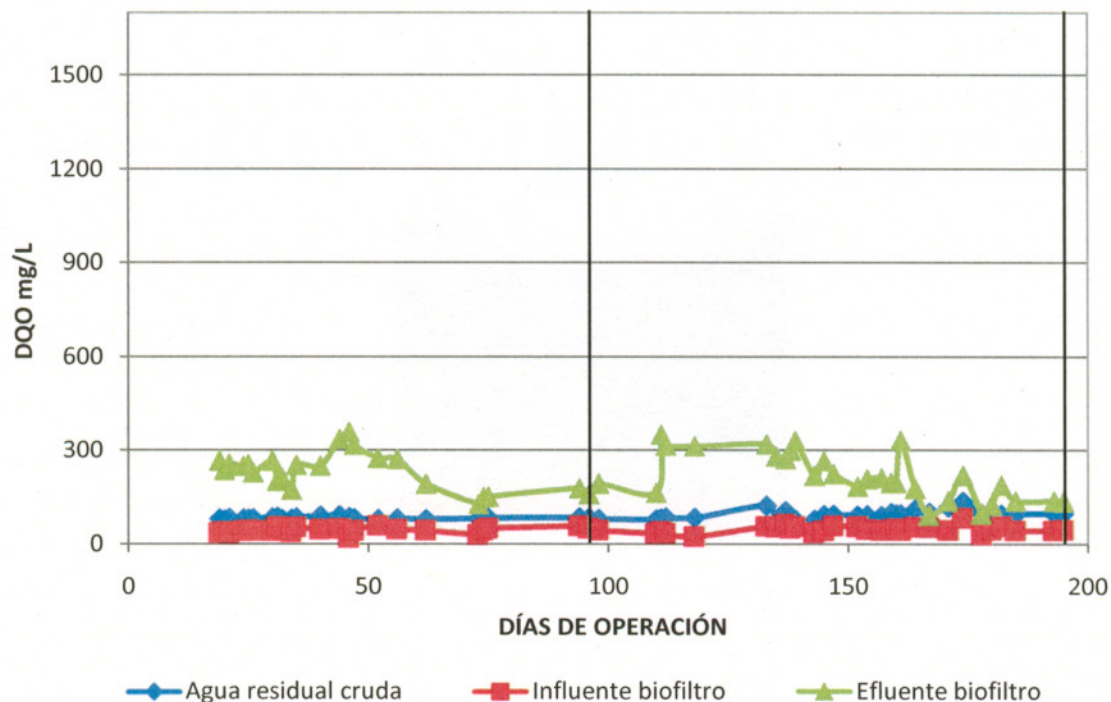
Gráfica 20 Comportamiento de la DQO en el proceso combinado con aditivos

Al pasar estas moléculas al biofiltro ocurre que continúan su degradación dando lugar a nuevas moléculas que requieren de una cantidad mayor de oxígeno para oxidar los radicales que van quedando al irse escindiendo los polímeros complejos que forman los

colorantes, por lo que la DQO se ve incrementada. Es probable que al aumento de la DQO en la salida del biofiltro también contribuyan tanto el arrastre de material de empaque como la biomasa contenida en el biofiltro aerobio, los cuales al ser orgánicos aportan DQO en las muestras del efluente tratado.

Por otra parte, el sistema de tratamiento de agua sintética que contiene únicamente colorantes en la fase de pretratamiento remueve un promedio de 47% de la DQO (Gráfica 21) de manera mucho más estable.

Mientras que en el proceso de biofiltración aerobia sobre cama orgánica, el comportamiento fue similar al tren con aditivos. Es decir, la DQO muestra un aumento del 170% debido a la descomposición de los polímeros que forman los colorantes. Cabe mencionar que no es probable que existan remanentes de peróxido de hidrógeno en el influente al biofiltro ya que a niveles de pH neutros el peróxido que pudiera estar aun presente en el efluente pretratado reacciona con el agua para formar nuevas moléculas de agua en el caso del agua sintética sin aditivos.

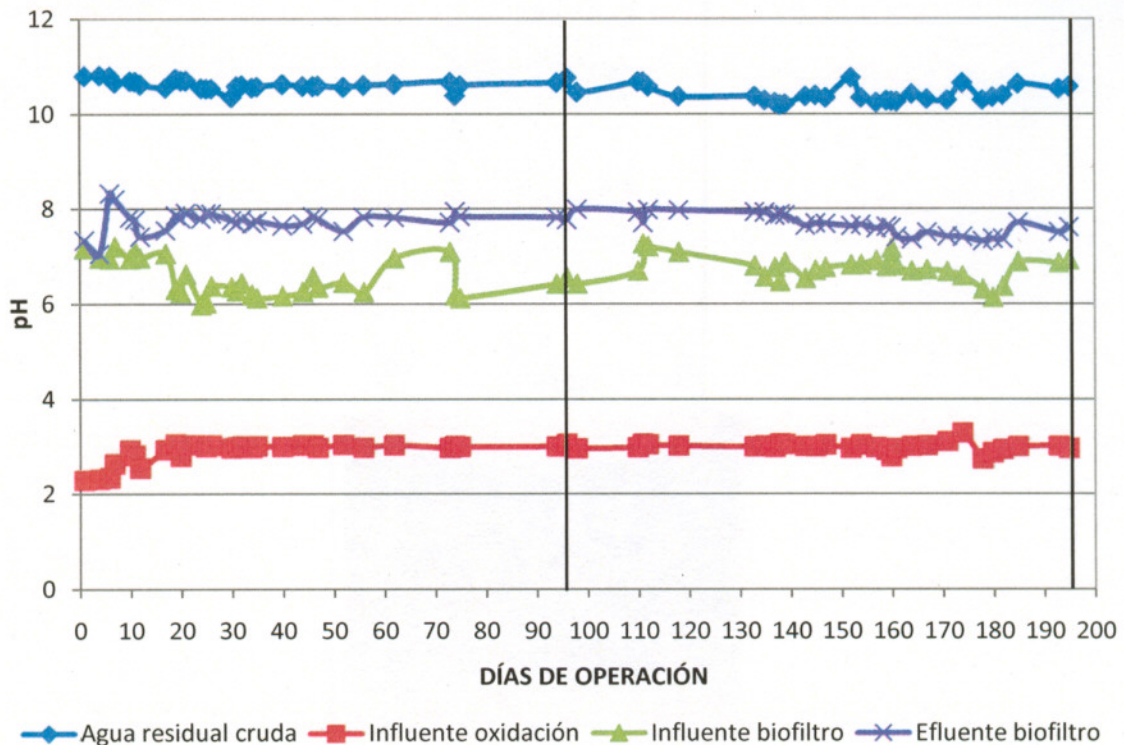


Gráfica 21 Comportamiento de la DQO en el proceso combinado sin aditivos

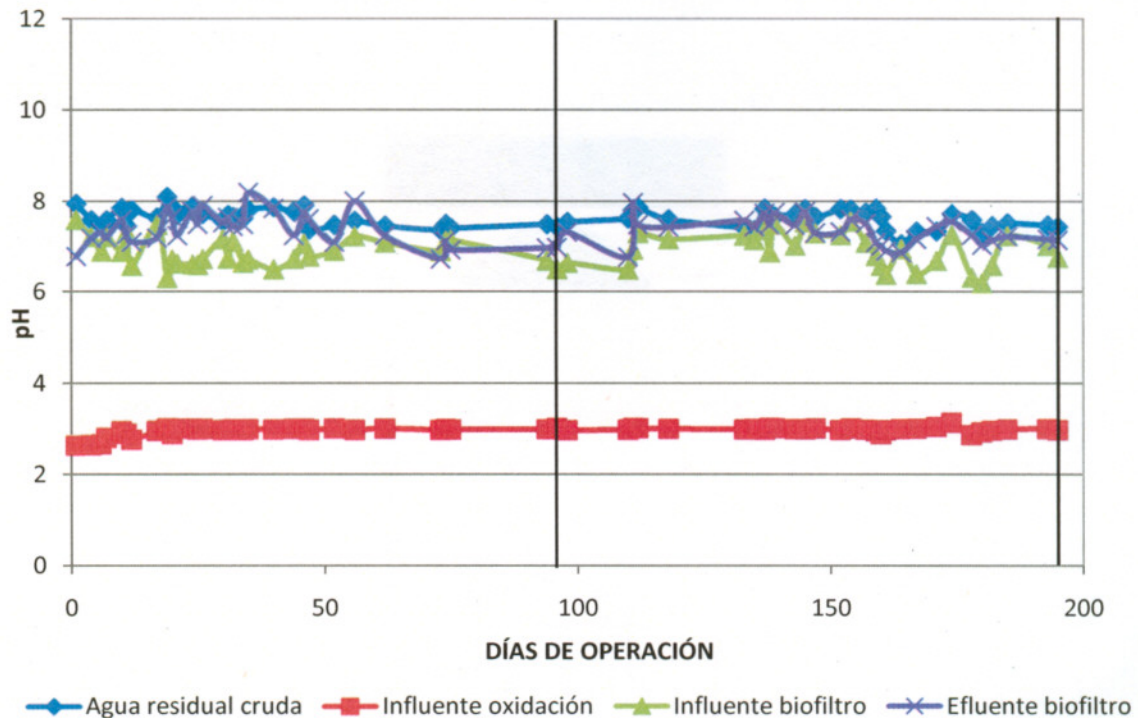
8.4.4 Parámetros de campo

8.4.4.1 pH

El pH del agua sintética cruda con aditivos muestra un valor promedio de 11 ± 0.17 debido principalmente a la presencia del bicarbonato de sodio. En el caso del agua sintética sin aditivos el pH tuvo un valor promedio de 7.6 ± 0.2 . Por otra parte, el comportamiento en ambos sistemas (Gráficas 22 y 23) se considera estable ya que no presenta variaciones que favorezcan la inhibición de los microorganismos para la remoción de los colorantes. Un valor de pH cercano al neutro permite un buen desarrollo de los microorganismos con el medio y por lo tanto llevan a cabo sus procesos metabólicos y la consecuente degradación de la materia orgánica.



Gráfica 22 Comportamiento del pH en el proceso combinado con aditivos

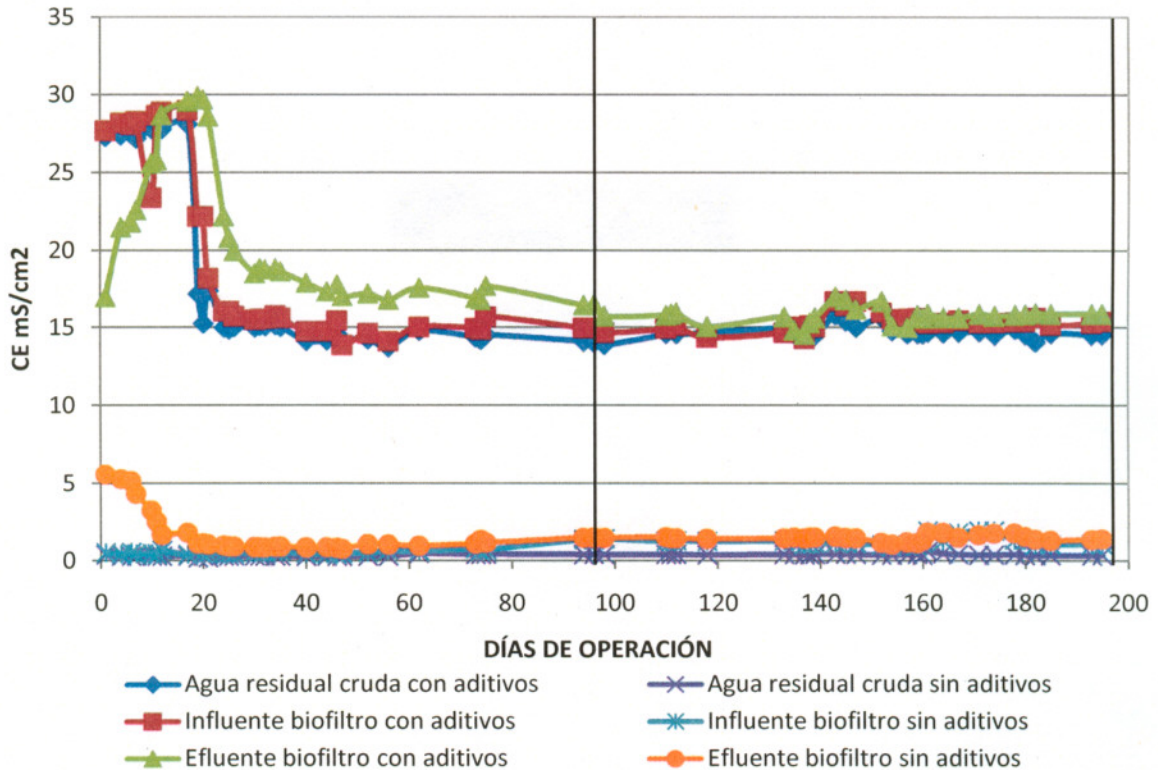


Gráfica 23 Comportamiento del pH en el proceso combinado sin aditivos

Cabe mencionar que el pH en el influente a los biofiltros tiende a acidificarse ligeramente mientras se encuentra almacenado debido a que en la fase de pretratamiento el agua debe ser acidificada y al llevarse a la fase neutra aun cuando se deja un exceso de neutralizante aun existen iones hidrógeno que lleven a la acidez.

8.4.4.2 Conductividad eléctrica

En el caso de la conductividad eléctrica no hay remoción en las fases de tratamiento, las altas conductividades encontradas al inicio de la fase experimental son debidas a los aditivos utilizados en el proceso de teñido, ya que el agua residual sintética con aditivos muestra una conductividad en promedio 14 veces mayor que el agua sintética sin aditivos (Gráfica 24)



Gráfica 24 Comportamiento de la conductividad en el proceso con y sin aditivos

En ambos biofiltros se observó que inicialmente se presenta un aumento en la concentración de la conductividad, la cual es debida principalmente al arrastre de material disuelto contenido en las fibras del material de empaque.

Por otra parte, la conductividad es más alta al entrar a los biofiltros debido a que para el pretratamiento es necesario reducir el pH del agua a un valor de 3 y una vez terminada la reacción de la fotólisis el pH se tiene que llevar a un valor de 7, lo cual incrementa la concentración de iones en el agua y el consecuente incremento de la conductividad en el agua pretratada.

8.4.4.3 Sólidos disueltos totales y salinidad

En el caso de estos dos parámetros el comportamiento es exactamente el mismo que para la conductividad en la tabla 8 se presenta un resumen de estos parámetros para ambos procesos de tratamiento; se puede observar la tendencia a incrementar de

ambos parámetros en cada etapa de tratamiento, lo que se explica bajo la misma razón expuesta para el incremento de la conductividad eléctrica.

Tabla 8.- Comportamiento de los sólidos disueltos totales y de las salinidad en los procesos combinados.

MUESTRA	Sólidos disueltos totales (g/L)		Salinidad (%)	
	Sin aditivos	Con aditivos	Sin aditivos	Con aditivos
Agua residual cruda	0.17 ± 0.031	9.45 ± 0.57	0.1 ± 0.054	9.54 ± 0.53
Efluente fotólisis de peróxido	0.45 ± 0.20	9.89 ± 0.94	0.41 ± 0.21	10.19 ± 0.96
Efluente biofiltro	0.81 ± 0.14	10.53 ± 2.08	0.79 ± 0.15	10.8 ± 2.21

9.- CONCLUSIONES

El proceso de tratamiento mediante un sistema combinado de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido con un proceso aerobio de biofiltración sobre cama orgánica, es una opción viable para tratar el agua residual de la industria textil que contiene colorantes y aditivos para la fijación de estos, ya que, remueve los colorantes y la toxicidad generada por estos, así como los aditivos usados en el proceso de teñido para la fijación de los colorantes. Se alcanzaron remociones de 80% y 93%, respectivamente.

Los procesos de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido y foto-Fenton utilizados como fase de pretratamiento para la degradación de los colorantes, mostraron una capacidad de remoción del 100% en un tiempo de reacción superior a las 6 h, con 1 mL/L de peróxido de hidrógeno para la fotólisis y 1 mL/L de peróxido más 0.0026 g/L de Fe^{2+} , condiciones que económicamente no son viables. Así mismo, se encontró que para este caso en particular ambos procesos tuvieron remociones semejantes para cada una de las dosis usadas, por lo que se determinó que el uso del reactivo de Fe^{2+} no era justificado. Razón por la cual se estableció el uso de la fotólisis de peróxido como fase de pretratamiento.

Se encontró que la dosis adecuada para degradar el 50% de las moléculas de colorante contenidas en el agua residual sintética, que incluye la mezcla de los aditivos utilizados en el proceso de teñido, en un tiempo de 2 h es 0.2 mL/L de peróxido de hidrógeno; mientras que, para alcanzar una remoción del 70% en el mismo tiempo de reacción, es necesario el uso de 0.8 mL/L de peróxido de hidrógeno.

En el proceso combinado se presentó inhibición de la remoción de los colorantes cuando el agua sintética contenía los aditivos. En el caso de la fotólisis de peróxido, ésta se asume que es atribuida a los carbonatos presentes en el agua los cuales interactúan con los radicales $\text{OH}\cdot$ creando reacciones competitivas con las moléculas de los colorantes y reducen la eficiencia del proceso de oxidación avanzada.

Para el proceso biológico aerobio de biofiltración sobre cama orgánica, la inhibición se puede atribuir a la alta salinidad, la cual se sabe es un factor limitante en el proceso metabólico de los microorganismos, que, al estar inhibidos reducen su eficiencia en la degradación de las moléculas remanentes en el efluente del proceso de oxidación avanzada.

En el agua residual sintética la toxicidad generada por los colorantes y los aditivos, se incrementó más de cuatro veces respecto a la toxicidad inicial después de ser pretratada por el proceso de fotólisis de peróxido, la cual se redujo en un 93% una vez que pasó a través del proceso de biofiltración sobre cama orgánica. Esto se puede explicar por la generación de metabolitos intermediarios, que son más fácilmente degradados por los microorganismos aerobios presentes en el proceso biológico.

Al comparar el proceso combinado de tratamiento para degradar colorantes presentes en un efluente de la industria textil con y sin aditivos, se observó una reducción en la eficiencia de remoción de los colorantes en el agua sintética con aditivos, principalmente en el caso de la fotólisis de peróxido, ya que, el tiempo requerido para alcanzar los niveles de remoción en el proceso con aditivos es 50% menor.

Para el caso del proceso biológico, se observó también una disminución en la eficiencia de remoción de los remanentes de los colorantes en 8%, la cual es atribuible en el caso del proceso con aditivos a la alta concentración de la salinidad.

Para el caso de la toxicidad, también se observan diferencias en la fase de pretratamiento, ya que la toxicidad en el agua con aditivos se incrementa hasta cuatro veces, disminuyendo en 93% después del tratamiento biológico; en tanto que, en el caso sin aditivos, la toxicidad se incrementó casi 30 veces respecto a la toxicidad inicial en la oxidación, reduciéndose a niveles no detectables después del proceso biológico.

10.- RECOMENDACIONES

Se recomienda la continuación del presente trabajo bajo diferentes líneas de investigación, las cuales a continuación se mencionan

- Es importante la determinación de los metabolitos intermediarios formados durante el proceso de oxidación avanzada, los cuales incrementan la toxicidad del efluente pretratado.
- Así mismo, identificar la comunidad de microorganismos que colonizaron el biofiltro aerobio sobre cama orgánica, ya que estos deben ser de tipo especializado ya que se encuentran dentro de un ambiente extremo debido, principalmente a las condiciones de salinidad.
- Estudiar procesos de tratamiento alternativos al proceso estudiado en el presente trabajo, tales como, una combinación de fotólisis de peróxido con adsorción sobre carbón activado y filtración con membranas, con la finalidad de remover colorante, compuestos orgánicos producto de la degradación de estos y de los aditivos utilizados en el proceso de teñido, así como de los sólidos disueltos como es el caso del cloruro de sodio.
- Así mismo para que el presente planteamiento resulte de un mayor atractivo de aplicación para la industria, se recomienda del uso de un intercambiador de calor, con la finalidad de ahorrar energía durante el proceso de teñido y de tratamiento, ya que, para el proceso de teñido se requiere de calentamiento de la fase líquida durante las etapas de teñido y, por otro lado, para que el peróxido de hidrógeno no sea descompuesto por efecto de la temperatura es necesario mantener ésta por debajo de los 40°C, por lo que es necesario el diseño de un sistema integral que permitirá, eficientar los procesos productivos y de tratamiento reduciendo los costos en ambos casos.

11.- ANEXOS

Anexo I.- Características del ficus utilizado para la biofiltración aerobia sobre material orgánico (García 2007).

Nombre científico: *Picus benjamina*

Características generales

Árbol siempre verde de 4-6 m de altura en nuestra zona, con copa densa y ramillas colgantes, muy ornamental (Figura 15). Corteza lisa, gris. Yemas terminales de color verde, agudas. Hojas alternas, de unos 10-12 cm de longitud, de forma ovado-elíptica, con la superficie verde brillante. El ápice es bastante acuminado, la base es redondeada y su textura es un poco coriácea. Pecíolos largos, de 2.5 cm de longitud, glabros, algo acanalados por la parte de arriba. Frutos axilares, sésiles, de globulares a oblongos, de alrededor de 1 cm de diámetro, de color purpura-rojizo en la madurez, contrastando con el verde del follaje.

Usos

Se usa como adorno de jardines y para proporcionar sombra.

Características fisicoquímicas

EC₅₀: Por contacto con el látex que tiene una acción irritante sobre la piel, por acción de las furocomarinas . También el simple contacto con la planta puede producir fotosensibilidad, que se muestra en forma de ampollas. Se tiene que evitar comer frutos no maduros, pues resultan tóxicos del aparato digestivo y pueden producir lesiones en las manos.

Costo y disponibilidad

Se puede obtener sin costo ya que es un desecho de la poda de jardines y áreas verdes municipales. Su disponibilidad es durante todo el año.



Figura 15. Fotografías del ficus

Anexo II.- Tablas de valores de las curvas de calibración para determinación de las concentraciones de los colorantes.

Colorantes con aditivos a pH normal		
Factor de dilución	[mg/L]	Abs
0	0	0
0.1	11.25	0.143
0.2	22.51	0.29
0.3	33.765	0.426
0.4	45.02	0.572
0.5	56.28	0.69
0.6	67.53	0.851
0.7	78.78	0.998
0.8	90.04	1.13
0.9	101.29	1.274
1	112.55	1.415

$Y = 79.641x - 0.1192$
 $R^2 = 0.9998$

Colorantes con aditivos a pH 3		
Factor de dilución	[mg/L]	Abs
0	0	0
0.1	11.25	0.139
0.2	22.51	0.28
0.3	33.765	0.418
0.4	45.02	0.548
0.5	56.28	0.69
0.6	67.53	0.822
0.7	78.78	0.959
0.8	90.04	1.095
0.9	101.29	1.236
1	112.55	1.365

$Y = 82.455x - 0.3352$
 $R^2 = 1$

Colorantes con aditivos a pH 7		
Factor de dilución	[mg/L]	Abs
0	0	0
0.1	11.25	0.159
0.2	22.51	0.302
0.3	33.765	0.432
0.4	45.02	0.57
0.5	56.28	0.732
0.6	67.53	0.869
0.7	78.78	1.001
0.8	90.04	1.145
0.9	101.29	1.274
1	112.55	1.414

$Y = 79.866x - 1.0699$
 $R^2 = 0.9997$

Colorantes sin aditivos a pH 7.4		
Factor de dilución	[mg/L]	Abs
0	0	0
0.1	11.25	0.154
0.2	22.51	0.321
0.3	33.765	0.456
0.4	45.02	0.614
0.5	56.28	0.771
0.6	67.53	0.868
0.7	78.78	1.115
0.8	90.04	1.254
0.9	101.29	1.426
1	112.55	1.593

$Y = 70.886x + 1.0347$
 $R^2 = 0.9976$

Colorantes sin aditivos a pH 3		
Factor de dilución	[mg/L]	Abs
0	0	0
0.1	11.25	0.173
0.2	22.51	0.336
0.3	33.765	0.495
0.4	45.02	0.654
0.5	56.28	0.81
0.6	67.53	0.9
0.7	78.78	1.157
0.8	90.04	1.31
0.9	101.29	1.473
1	112.55	1.646

$Y=68.916x + 0.1765$
 $R^2= 0.9976$

Anexo III.- Resultados analíticos de los procesos de oxidación avanzada de fotólisis de peróxido.

Fotólisis de peróxido 1 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	113.43	1.00	0.00
5	95.50	0.84	15.80
10	92.73	0.82	18.25
15	89.02	0.78	21.52
20	84.43	0.74	25.56
25	81.73	0.72	27.94
30	76.84	0.68	32.25
35	75.12	0.66	33.77
40	69.94	0.62	38.34
45	66.74	0.59	41.16
50	63.99	0.56	43.58
55	60.96	0.54	46.26
60	58.59	0.52	48.34

Fotólisis de peróxido repetición 1 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	113.73	1.00	0.00
5	91.02	0.80	19.97
10	85.62	0.75	24.71
15	80.19	0.71	29.49
20	76.72	0.67	32.54
25	71.33	0.63	37.28
30	68.98	0.61	39.35
35	64.79	0.57	43.03
40	60.80	0.53	46.54
45	58.04	0.51	48.97
50	55.71	0.49	51.01
55	53.19	0.47	53.23
60	51.77	0.46	54.48
70	46.66	0.41	58.97
80	41.56	0.37	63.46
90	37.72	0.33	66.83
100	34.63	0.30	69.55
110	32.72	0.29	71.23
120	28.80	0.25	74.68
140	22.38	0.20	80.32
150	20.25	0.18	82.19
200	12.09	0.11	89.37
280	3.53	0.03	96.90
360	0.22	0.00	99.81
390	0.00	0.00	100.00

Fotólisis de peróxido 1 mL/L			
T (min)	C/Co med	S	% REM
0	1.00	0.00	0.00
5	0.82	0.03	17.88
10	0.79	0.05	21.48
15	0.74	0.06	25.50
20	0.71	0.05	29.05
25	0.67	0.07	32.61
30	0.64	0.05	35.80
35	0.62	0.07	38.40
40	0.58	0.06	42.44
45	0.55	0.06	45.06
50	0.53	0.05	47.30
55	0.50	0.05	49.74
60	0.49	0.04	51.41

Fotólisis de peróxido 0.8 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	111.84	1.00	0.00
5	97.76	0.87	12.59
10	95.42	0.85	14.68
15	91.77	0.82	17.94
20	88.48	0.79	20.89
25	86.48	0.77	22.67
30	82.69	0.74	26.06
35	80.40	0.72	28.11
40	76.44	0.68	31.65
45	74.08	0.66	33.76
50	70.97	0.63	36.54
55	68.60	0.61	38.66
60	66.08	0.59	40.92

Fotólisis de peróxido repetición 0.8 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	115.84	1.00	0.00
5	99.68	0.86	13.95
10	95.03	0.82	17.97
15	91.30	0.79	21.19
20	86.66	0.75	25.19
25	84.05	0.73	27.44
30	80.12	0.69	30.84
35	76.37	0.66	34.07
40	72.27	0.62	37.61
45	70.16	0.61	39.43
50	66.21	0.57	42.84
55	63.45	0.55	45.23
60	61.55	0.53	46.87
70	54.76	0.47	52.73
80	50.06	0.43	56.79
90	46.32	0.40	60.01
100	42.19	0.36	63.58
110	38.18	0.33	67.04
120	33.97	0.29	70.68
130	27.95	0.24	75.87
140	23.15	0.20	80.02
150	20.82	0.18	82.03
170	16.89	0.15	85.42
180	15.14	0.13	86.93
190	13.48	0.12	88.36
200	12.27	0.11	89.41
210	11.02	0.10	90.49

Fotólisis de peróxido 0.8 mL/L			
T (min)	C/Co med	S	% REM
0	1.00	0.00	0
5	0.87	0.01	13
10	0.84	0.02	16
15	0.80	0.02	20
20	0.77	0.03	23
25	0.75	0.03	25
30	0.72	0.03	28
35	0.69	0.04	31
40	0.65	0.04	35
45	0.63	0.04	37
50	0.60	0.04	40
55	0.58	0.05	42
60	0.56	0.04	44

Fotólisis de peróxido 0.4 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	115.01	1.00	0.00
5	90.15	0.78	21.62
10	86.04	0.75	25.19
15	82.46	0.72	28.30
20	79.40	0.69	30.96
25	78.25	0.68	31.96
30	75.07	0.65	34.73
35	73.27	0.64	36.29
40	72.44	0.63	37.01
45	72.02	0.63	37.38
50	71.65	0.62	37.70
55	70.36	0.61	38.82
60	69.23	0.60	39.81

Fotólisis de peróxido repetición 0.4 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	111.49	1.00	0.00
5	105.37	0.95	5.49
10	102.46	0.92	8.10
15	98.59	0.88	11.57
20	94.79	0.85	14.98
25	91.56	0.82	17.88
30	87.60	0.79	21.42
35	83.49	0.75	25.12
40	81.56	0.73	26.85
45	78.29	0.70	29.78
50	76.33	0.68	31.54
55	73.86	0.66	33.75
60	70.69	0.63	36.59
70	66.25	0.59	40.58
80	62.16	0.56	44.25
90	58.20	0.52	47.80
100	54.98	0.49	50.68
110	52.05	0.47	53.32
120	49.59	0.44	55.52
130	46.84	0.42	57.99
140	45.49	0.41	59.20
150	42.34	0.38	62.03
160	40.62	0.36	63.57
170	38.52	0.35	65.45
180	36.13	0.32	67.59
190	34.02	0.31	69.49
200	32.16	0.29	71.16

Fotólisis de peróxido 0.4 mL/L			
T (min)	C/Co med	S	% REM
0	1.00	0.00	0.00
5	0.86	0.11	13.55
10	0.83	0.12	16.64
15	0.80	0.12	19.94
20	0.77	0.11	22.97
25	0.75	0.10	24.92
30	0.72	0.09	28.08
35	0.69	0.08	30.70
40	0.68	0.07	31.93
45	0.66	0.05	33.58
50	0.65	0.04	34.62
55	0.64	0.04	36.29
60	0.62	0.02	38.20

Fotólisis de peróxido 0.2 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	113.80	1.00	0.00
5	89.48	0.79	21.37
10	87.82	0.77	22.83
15	86.83	0.76	23.70
20	84.96	0.75	25.34
25	82.57	0.73	27.44
30	81.92	0.72	28.01
35	79.26	0.70	30.35
40	77.47	0.68	31.92
45	75.95	0.67	33.26
50	74.24	0.65	34.76
55	73.17	0.64	35.70
60	70.90	0.62	37.70
70	68.20	0.60	40.07
80	65.93	0.58	42.07
90	61.32	0.54	46.12
100	58.04	0.51	49.00
110	56.34	0.50	50.49
120	54.17	0.48	52.40
130	52.66	0.46	53.73

Fotólisis de peróxido repetición 0.2 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	112.40	1.00	0.00
5	95.82	0.85	14.75
10	90.73	0.81	19.28
15	87.83	0.78	21.86
20	73.37	0.65	34.72
25	71.52	0.64	36.37
30	69.15	0.62	38.48
35	67.66	0.60	39.80
40	64.05	0.57	43.02
45	62.57	0.56	44.33
50	59.37	0.53	47.18
55	56.88	0.51	49.40
60	55.52	0.49	50.60
70	51.68	0.46	54.02
80	48.41	0.43	56.93
90	45.71	0.41	59.33
100	42.70	0.38	62.01
110	39.95	0.36	64.46
120	37.37	0.33	66.75
130	36.09	0.32	67.89

Fotólisis de peróxido 3a repetición 0.2 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	112.33	1.00	0.00
5	96.65	0.86	13.96
10	92.37	0.82	17.77
15	86.83	0.77	22.70
20	84.96	0.76	24.37
25	82.57	0.74	26.49
30	81.92	0.73	27.07
35	79.26	0.71	29.44
40	77.47	0.69	31.03
45	75.95	0.68	32.39
50	74.24	0.66	33.91
55	73.17	0.65	34.86
60	70.90	0.63	36.88
70	68.20	0.61	39.29
80	65.93	0.59	41.31
90	61.32	0.55	45.41
100	58.04	0.52	48.33
110	56.34	0.50	49.84
120	54.17	0.48	51.78
130	52.66	0.47	53.12

Fotólisis de peróxido 0.2mL/L			
T (min)	C/Co med	S	% REM
0	1.00	0.00	0.00
5	0.83	0.04	16.69
10	0.80	0.03	19.96
15	0.77	0.01	22.75
20	0.72	0.06	28.14
25	0.70	0.05	30.10
30	0.69	0.06	31.19
35	0.67	0.06	33.20
40	0.65	0.07	35.32
45	0.63	0.07	36.66
50	0.61	0.07	38.62
55	0.60	0.08	39.99
60	0.58	0.08	41.73
70	0.56	0.08	44.46
80	0.53	0.09	46.77
90	0.50	0.08	50.29
100	0.47	0.08	53.11
110	0.45	0.08	54.93
120	0.43	0.08	56.98
130	0.42	0.08	58.25

Fotólisis de peróxido 0.1 mL/L			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	114.72	1.00	0.00
5	94.63	0.82	0.18
10	92.82	0.81	0.19
15	91.76	0.80	0.20
20	90.06	0.79	0.21
25	88.65	0.77	0.23
30	86.64	0.76	0.24
35	86.2	0.75	0.25
40	84.67	0.74	0.26
45	83.42	0.73	0.27
50	82.57	0.72	0.28
55	81.6	0.71	0.29
60	81.39	0.71	0.29
70	78.74	0.69	0.31
80	78.03	0.68	0.32
90	77.17	0.67	0.33
100	76.04	0.66	0.34
110	74.48	0.65	0.35
120	73.99	0.64	0.36

Anexo IV.- Resultados analíticos de los procesos de oxidación avanzada de foto-Fenton.

Foto-Fenton 1 mL/L de peróxido y 0.02152 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	114.18	1	0
5	83.01	0.73	27.30
10	82.23	0.72	27.98
15	77.86	0.68	31.81
20	76.88	0.67	32.67
25	74.65	0.65	34.62
30	71.54	0.63	37.34
35	69.79	0.61	38.88
40	68.90	0.60	39.66
45	67.16	0.59	41.18
50	66.39	0.58	41.86
55	64.00	0.56	43.95
60	61.91	0.54	45.78
70	60.58	0.53	46.94
80	57.69	0.51	49.47
90	54.81	0.48	52.00
100	51.93	0.45	54.52
110	53.13	0.47	53.47
120	52.10	0.46	54.37

Foto-Fenton 1 mL/L de peróxido y 0.01076 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	114.51	1.00	0.00
5	109.59	0.96	4.30
10	103.56	0.90	9.56
15	98.07	0.86	14.36
20	94.58	0.83	17.40
25	89.21	0.78	22.09
30	83.27	0.73	27.28
35	78.65	0.69	31.32
40	76.50	0.67	33.19
45	73.37	0.64	35.93
50	70.67	0.62	38.28
55	69.66	0.61	39.17
60	68.18	0.60	40.46
70	66.67	0.58	41.78
80	64.02	0.56	44.09
90	56.78	0.50	50.41
100	50.77	0.44	55.66
110	45.62	0.40	60.16
120	41.06	0.36	64.14

Foto-Fenton 1 mL/L de peróxido y 0.00538 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	114.28	1.00	0.00
5	113.37	0.99	0.80
10	107.05	0.94	6.33
15	103.23	0.90	9.67
20	98.96	0.87	13.41
25	95.24	0.83	16.66
30	91.79	0.80	19.68
35	89.45	0.78	21.73
40	86.58	0.76	24.24
45	84.36	0.74	26.18
50	81.77	0.72	28.45
55	79.82	0.70	30.15
60	76.55	0.67	33.02
70	72.11	0.63	36.90
80	70.72	0.62	38.12
90	68.24	0.60	40.29
100	67.74	0.59	40.72
110	64.01	0.56	43.99
120	58.93	0.52	48.43

Foto-Fenton 1 mL/L de peróxido y 0.00269 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	119.69	1.00	0.00
5	85.76	0.72	28.35
10	80.07	0.67	33.10
15	75.50	0.63	36.92
20	72.52	0.61	39.41
25	69.42	0.58	42.00
30	65.89	0.55	44.95
35	62.96	0.53	47.40
40	61.46	0.51	48.65
45	56.78	0.47	52.56
50	54.64	0.46	54.35
55	51.86	0.43	56.67
60	50.15	0.42	58.10
70	44.05	0.37	63.20
80	40.31	0.34	66.32
90	38.23	0.32	68.06
100	35.20	0.29	70.59
110	32.55	0.27	72.81
120	29.52	0.25	75.34
130	26.37	0.22	77.97
140	24.74	0.21	79.33
150	22.69	0.19	81.04
160	21.20	0.18	82.29
170	19.76	0.17	83.49
180	17.75	0.15	85.17
190	16.89	0.14	85.89
200	15.45	0.13	87.09
210	13.82	0.12	88.45
220	12.96	0.11	89.17
230	11.72	0.10	90.21
240	10.71	0.09	91.05
250	9.60	0.08	91.98
330	4.28	0.04	96.42
355	4.05	0.03	96.62
360	3.33	0.03	97.22

Foto-Fenton 0.8 mL/L de peróxido y 0.02152 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	117.64	1.00	0.00
5	115.32	0.98	1.97
10	113.20	0.96	3.77
15	110.45	0.94	6.11
20	108.34	0.92	7.91
25	105.58	0.90	10.25
30	103.76	0.88	11.80
35	100.93	0.86	14.20
40	99.18	0.84	15.69
45	96.47	0.82	18.00
50	94.27	0.80	19.87
55	91.57	0.78	22.16
60	87.60	0.74	25.54
70	83.30	0.71	29.19
80	79.06	0.67	32.79
90	75.28	0.64	36.01
100	70.94	0.60	39.70
110	66.99	0.57	43.06
120	63.52	0.54	46.00

Foto-Fenton 0.8 mL/L de peróxido y 0.01076 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	117.32	1.00	0.00
5	116.22	0.99	0.94
10	111.18	0.95	5.23
15	109.32	0.93	6.82
20	107.02	0.91	8.78
25	105.32	0.90	10.23
30	101.29	0.86	13.66
35	97.54	0.83	16.86
40	94.36	0.80	19.57
45	92.06	0.78	21.53
50	90.12	0.77	23.18
55	88.78	0.76	24.33
60	86.11	0.73	26.60
70	82.62	0.70	29.58
80	78.64	0.67	32.97
90	73.58	0.63	37.28
100	69.75	0.59	40.55
110	66.04	0.56	43.71
120	62.11	0.53	47.06

Foto-Fenton 0.8 mL/L de peróxido y 0.00538 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	117.91	1.00	0.00
5	113.47	0.96	3.77
10	109.76	0.93	6.91
15	106.35	0.90	9.80
20	103.32	0.88	12.37
25	98.57	0.84	16.40
30	93.82	0.80	20.43
35	89.81	0.76	23.83
40	86.40	0.73	26.72
45	82.79	0.70	29.79
50	79.66	0.68	32.44
55	76.07	0.65	35.48
60	74.42	0.63	36.88
70	68.38	0.58	42.01
80	64.32	0.55	45.45
90	59.16	0.50	49.83
100	54.57	0.46	53.72
110	49.05	0.42	58.40
120	44.95	0.38	61.88

Foto-Fenton 0.8 mL/L de peróxido y 0.00269 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	117.11	1.00	0.00
5	114.33	0.98	2.37
10	109.05	0.93	6.88
15	104.16	0.89	11.06
20	98.97	0.85	15.49
25	94.67	0.81	19.16
30	88.97	0.76	24.03
35	84.57	0.72	27.79
40	80.55	0.69	31.22
45	76.57	0.65	34.62
50	73.04	0.62	37.63
55	69.95	0.60	40.27
60	66.55	0.57	43.17
70	60.10	0.51	48.68
80	52.94	0.45	54.79
90	46.87	0.40	59.98
100	42.11	0.36	64.04
110	37.21	0.32	68.23
120	33.61	0.29	71.30

Foto-Fenton 0.4 mL/L de peróxido y 0.02152 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	116.25	1.00	0.00
5	115.86	1.00	0.34
10	103.38	0.89	11.07
15	101.23	0.87	12.92
20	99.07	0.85	14.78
25	97.12	0.84	16.46
30	96.10	0.83	17.33
35	93.93	0.81	19.20
40	92.50	0.80	20.43
45	91.56	0.79	21.24
50	89.34	0.77	23.15
55	87.69	0.75	24.57
60	85.81	0.74	26.18
70	82.07	0.71	29.40
80	79.17	0.68	31.90
90	75.77	0.65	34.82
100	72.87	0.63	37.32
110	69.43	0.60	40.28
120	65.78	0.57	43.42

Foto-Fenton 0.4 mL/L de peróxido y 0.01076 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	114.62	1.00	0.00
5	102.20	0.89	10.84
10	100.77	0.88	12.08
15	99.48	0.87	13.21
20	98.30	0.86	14.24
25	96.73	0.84	15.61
30	94.15	0.82	17.86
35	91.67	0.80	20.02
40	89.02	0.78	22.33
45	86.49	0.75	24.54
50	86.02	0.75	24.95
55	84.11	0.73	26.62
60	82.10	0.72	28.37
70	79.85	0.70	30.34
80	77.33	0.67	32.53
90	75.51	0.66	34.12
100	72.75	0.63	36.53
110	70.73	0.62	38.29
120	68.63	0.60	40.12

Foto-Fenton 0.4 mL/L de peróxido y 0.00538 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	116.59	1.00	0.00
5	99.14	0.85	14.97
10	98.76	0.85	15.29
15	97.51	0.84	16.37
20	96.23	0.83	17.46
25	95.55	0.82	18.05
30	95.05	0.82	18.47
35	93.97	0.81	19.40
40	92.09	0.79	21.01
45	90.03	0.77	22.78
50	89.25	0.77	23.45
55	87.56	0.75	24.90
60	86.03	0.74	26.21
70	83.61	0.72	28.29
80	80.65	0.69	30.83
90	78.15	0.67	32.97
100	75.82	0.65	34.97
110	72.92	0.63	37.46
120	70.93	0.61	39.16

Foto-Fenton 0.4 mL/L de peróxido y 0.00269 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	114.03	1.00	0.00
5	94.46	0.83	17.16
10	93.15	0.82	18.31
15	90.53	0.79	20.61
20	87.45	0.77	23.31
25	83.55	0.73	26.73
30	81.87	0.72	28.20
35	79.02	0.69	30.70
40	78.20	0.69	31.42
45	74.96	0.66	34.26
50	73.86	0.65	35.23
55	71.88	0.63	36.96
60	71.03	0.62	37.71
70	67.24	0.59	41.03
80	64.39	0.56	43.53
90	61.55	0.54	46.02
100	58.70	0.51	48.52
110	55.86	0.49	51.01
120	53.01	0.46	53.51
130	50.17	0.44	56.00
140	47.32	0.42	58.50
150	44.48	0.39	60.99
160	43.30	0.38	62.03
180	39.20	0.34	65.62
221	34.40	0.30	69.83

Foto-Fenton 0.2 mL/L de peróxido y 0.02152 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	116.71	1.00	0.00
5	96.47	0.83	17.34
10	94.79	0.81	18.78
15	93.77	0.80	19.66
20	91.96	0.79	21.21
25	90.84	0.78	22.17
30	89.44	0.77	23.37
35	88.11	0.75	24.51
40	86.98	0.75	25.47
45	85.67	0.73	26.60
50	84.68	0.73	27.44
55	83.56	0.72	28.40
60	82.28	0.70	29.50
70	80.41	0.69	31.10
80	78.54	0.67	32.70
90	76.55	0.66	34.41
100	74.37	0.64	36.28
110	72.54	0.62	37.85
120	65.89	0.56	43.54

Foto-Fenton 0.2 mL/L de peróxido y 0.01076 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	116.60	1.00	0.00
5	107.27	0.92	8.00
10	105.02	0.90	9.93
15	104.28	0.89	10.57
20	103.36	0.89	11.36
25	102.20	0.88	12.35
30	101.72	0.87	12.76
35	100.12	0.86	14.13
40	97.27	0.83	16.58
45	95.06	0.82	18.47
50	90.96	0.78	21.99
55	89.37	0.77	23.35
60	88.59	0.76	24.02
70	87.26	0.75	25.16
80	85.07	0.73	27.04
90	84.39	0.72	27.62
100	83.19	0.71	28.65
110	82.73	0.71	29.05
120	81.17	0.70	30.39

Foto-Fenton 0.2 mL/L de peróxido y 0.00538 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	116.36	1.00	0.00
5	111.05	0.95	4.56
10	110.05	0.95	5.42
15	109.22	0.94	6.14
20	108.16	0.93	7.05
25	107.94	0.93	7.24
30	106.70	0.92	8.30
35	105.84	0.91	9.04
40	104.36	0.90	10.31
45	103.15	0.89	11.35
50	102.75	0.88	11.70
55	101.17	0.87	13.05
60	100.14	0.86	13.94
70	98.89	0.85	15.01
80	97.47	0.84	16.23
90	95.70	0.82	17.76
100	93.04	0.80	20.04
110	91.29	0.78	21.55
120	89.55	0.77	23.04

Foto-Fenton 0.2 mL/L de peróxido y 0.00269 gr FeSO ₄ -7H ₂ O			
T (min)	[mg/L]	C/Co	% REM
0	116.63	1.00	0.00
5	107.78	0.92	7.59
10	106.87	0.92	8.37
15	105.81	0.91	9.28
20	104.19	0.89	10.67
25	103.02	0.88	11.67
30	102.25	0.88	12.33
35	101.50	0.87	12.97
40	100.42	0.86	13.90
45	99.08	0.85	15.05
50	97.91	0.84	16.05
55	96.73	0.83	17.06
60	95.57	0.82	18.06
70	93.91	0.81	19.48
80	92.55	0.79	20.65
90	91.20	0.78	21.80
100	88.42	0.76	24.19
110	86.34	0.74	25.97
120	83.87	0.72	28.09

Anexo V.- Resultados analíticos de la operación de los reactores para la remoción de colorantes presentes en un agua sintética de un efluente de la industria textil con aditivos y sin aditivos.

DQO											
Fecha	Días de operación	Agua residual cruda con aditivos	Influyente biofiltro con aditivos		Efluente biofiltro con aditivos		Agua residual cruda sin aditivos	Influyente biofiltro sin aditivos		Efluente biofiltro sin aditivos	
		[mg/L]	[mg/L]	% REM	[mg/L]	% REM	[mg/L]	[mg/L]	% REM	[mg/L]	% REM
25/04/2008	1				1477					1700.4	
29/04/2008	4				1022					1616.2	
01/05/2008	6										
02/05/2008	7										
05/05/2008	10				546			86.26		258.3	
06/05/2008	11										
07/05/2008	12	1616	759	53	754	53		96.66		382.45	
12/05/2008	17				626					311.37	
14/05/2008	19	1482	603	59	717	52	82	39	53	267	-225
15/05/2008	20	806	340	58	698	13	79	42	47	237	-200
16/05/2008	21	858	368	57	776	10	84	35	58	257	-206
19/05/2008	24	559	501	10	545	3	82	44	46	249	-204
20/05/2008	25	1388	882	36	1289	7	81	47	42	254	-214
21/05/2008	26	983	778	21	713	28	83	45	46	229	-176
25/05/2008	30	906	651	28	597	34	85	44	48	267	-214
26/05/2008	31	435	375	14	655	-51	87	57	34	202	-132
27/05/2008	32	854	822	4	599	30	80	55	31	212	-165
29/05/2008	34	409	356	13	392	4	81	40	50	174	-115
30/05/2008	35	548	438	20	721	-32	85	56	34	253	-198
04/06/2008	40	406	307	24	630	-55	91	48	47	250	-176
08/06/2008	44	876	253	71	558	36	92	51	44	338	-267
10/06/2008	46	276	254	8	337	-22	86	22	74	359	-319
11/06/2008	47	440	289	34	432	2	82	45	45	317	-284
16/06/2008	52	605	324	46	528	13	79	61	23	275	-247
20/06/2008	56	1421	623	56	773	46	82	48	41	272	-231

26/06/2008	62	959	500	48	613	36	80	46	43	193	-141
07/07/2008	73	497	320	36	454	9	82	32	61	128	-56
08/07/2008	74	430	315	27	456	-6	83	45	45	149	-81
09/07/2008	75	1527	370	76	679	56	83	52	38	152	-82
28/07/2008	94	420	307	27	243	42	85	59	31	178	-109
30/07/2008	96	420	252	40	338	19	84	52	38	160	-91
01/08/2008	98	401	262	35	390	3	80	46	42	193	-142
13/08/2008	110	362	156	57	371	-2	79	35	56	164	-108
14/08/2008	111	385	140	64	350	9	82	42	49	350	-327
15/08/2008	112	651	345	47	491	25	85	35	58	314	-270
21/08/2008	118	396	250	37	259	35	84	25	70	312	-272
05/09/2008	133	453	345	24	471	-4	122	58	52	319	-161
07/09/2008	135	404	264	35	372	8	70	55	22	280	-300
09/09/2008	137	489	411	16	343	30	105	64	39	272	-159
10/09/2008	138	515	371	28	292	43	84	52	38	298	-254
11/09/2008	139	429	345	20	316	26	78	57	27	330	-323
15/09/2008	143	405	305	25	338	17	78	37	52	218	-179
17/09/2008	145	345	233	33	308	10	93	44	52	265	-186
19/09/2008	147	347	233	33	308	11	94	59	37	223	-138
24/09/2008	152	419	314	25	304	27	91	56	38	184	-101
26/09/2008	154	421	229	46	293	30	93	48	48	207	-124
29/09/2008	157	472	344	27	366	22	90	45	50	211	-135
01/10/2008	159	484	409	16	385	20	99	47	52	195	-97
02/10/2008	160	355	290	18	342	4	95	50	47	195	-106
03/10/2008	161	360	196	46	366	-2	95	45	53	332	-248
06/10/2008	164	386	260	33	320	17	110	55	50	177	-60
09/10/2008	167	313	226	28	320	-2	100	54	46	93	6
13/10/2008	171	339	216	36	336	1	118	45	62	138	-17
16/10/2008	174	442	333	25	320	28	135	83	38	218	-62
20/10/2008	178	404	269	33	265	34	96	30	68	98	-2
22/10/2008	180	456	257	44	282	38	95	46	52	125	-31
24/10/2008	182	414	273	34	209	50	94	57	40	187	-99
27/10/2008	185	411	197	52	335	19	95	44	54	137	-44
04/11/2008	193	420	214	49	316	25	96	44	54	137	-42
06/11/2008	195	425	235	45	321	24	96	46	53	134	-40

COLORANTE											
Fecha	Días de operación	Agua residual cruda con aditivos	Influyente biofiltro con aditivos		Efluente biofiltro con aditivos		Agua residual cruda sin aditivos	Influyente biofiltro sin aditivos		Efluente biofiltro sin aditivos	
		[mg/L]	[mg/L]	% REM	[mg/L]	% REM	[mg/L]	[mg/L]	% REM	[mg/L]	% REM
25/04/2008	1	118.29	55.81	53		100	114.61	48.88	57		100
29/04/2008	4	114.48	59.64	48		100	109.47	48.83	55		100
01/05/2008	6	119.45	60.97	49		100	115.26	55.25	52		100
02/05/2008	7	115.59	56.82	51		100	109.5	48.33	56		100
05/05/2008	10	114.76	58.63	49		100	109.52	54.11	51		100
06/05/2008	11	113.15	57.55	49		100	113.93	52.95	54		100
07/05/2008	12	113.12	56.77	50		100	112.98	52.74	53		100
12/05/2008	17	112.42	56.01	50		100	110.8	46.34	58		100
14/05/2008	19	110.07	60.98	45	28.62	74	118.39	38.2	68	23.75	80
15/05/2008	20	110.33	61.18	45	27.17	75	116.59	36.83	68	23.11	80
16/05/2008	21	109.41	58.42	47	29.67	73	115.37	36.09	69	24.28	79
19/05/2008	24	109.99	52.49	52	32.38	71	112.11	33.81	70	18.55	83
20/05/2008	25	110.29	54.64	50	33.63	70	114.19	34.29	70	19.77	83
21/05/2008	26	110.51	55.75	50	36.14	67	107.6	35.92	67	17.135	84
25/05/2008	30	110.72	56.85	49	38.65	65	107.74	37.55	65	14.5	87
26/05/2008	31	111.62	49.23	56	43.11	61	108.35	36.61	66	13.49	88
27/05/2008	32	111.11	51.56	54	42.83	61	107.57	36.37	66	11.35	89
29/05/2008	34	108.66	54.41	50	43.22	60	107.85	34.11	68	11.18	90
30/05/2008	35	107.87	53.38	51	41.42	62	105.25	33.11	69	19.23	82
04/06/2008	40	109.5	54.41	50	39.16	64	106.21	37.56	65	19.64	82
08/06/2008	44	107.21	52.17	51	36.06	66	105.65	35.57	66	28.48	73
10/06/2008	46	107.33	51.71	52	33.96	68	111.26	37.14	67	28.79	74
11/06/2008	47	105.74	49.77	53	33.96	68	112.54	40	64	27.02	76
16/06/2008	52	106.87	56.58	47	35.52	67	110.17	35.97	67	18.8	83
20/06/2008	56	105.78	63.05	40	42.81	60	108.47	32.67	70	11.74	89
26/06/2008	62	107.46	76.65	29	40.82	62	114.41	32.45	72	9.86	91
07/07/2008	73	108.12	60.97	44	35.01	68	110.99	47.53	57	8.64	92
08/07/2008	74	105.9	59.91	43	33.19	69	108.91	48.96	55	9.55	91

09/07/2008	75	109.78	60.26	45	32.18	71	108.97	45.09	59	12.25	89
28/07/2008	94	106.53	53.18	50	32.55	69	115.41	32.05	72	13.8	88
30/07/2008	96	106.4	55.08	48	33.77	68	114.08	35.64	69	13.61	88
01/08/2008	98	105.94	59.08	44	35.54	66	114.06	35.4	69	12.96	89
13/08/2008	110	107.16	43.41	59	33.58	69	109.85	30.92	72	13.6	88
14/08/2008	111	107.11	45.15	58	37.71	65	108.96	28.63	74	13.13	88
15/08/2008	112	106.45	42.01	61	37.88	64	109.09	31.67	71	18.45	83
21/08/2008	118	106.96	48.45	55	30.22	72	109.29	31.8	71	18.58	83
05/09/2008	133	103.5	39.83	62	21.41	79	109.87	25.74	77	13.6	88
07/09/2008	135	104.06	35.87	66	21.41	79	108.54	23.9	78	15.53	86
09/09/2008	137	103.66	32.54	69	19.68	81	114.59	28.98	75	12.14	89
10/09/2008	138	102.95	33.22	68	21.57	79	115.09	29.71	74	13.14	89
11/09/2008	139	103.38	34.26	67	20.74	80	114.25	29.33	74	11.49	90
15/09/2008	143	106.38	32.49	69	24.07	77	107.22	29.3	73	12.02	89
17/09/2008	145	106.23	29.82	72	22.32	79	107.93	29.06	73	10.05	91
19/09/2008	147	104.92	31.69	70	22.82	78	108.68	29.74	73	9.3	91
24/09/2008	152	106.98	30.18	72	22.82	79	104.32	34.09	67	8.04	92
26/09/2008	154	106.97	36.51	66	20.85	81	107.36	33.81	69	8.73	92
29/09/2008	157	106	32.69	69	21.02	80	106.16	35.25	67	9.33	91
01/10/2008	159	104.82	30.31	71	20.07	81	107.32	38.77	64	8.02	93
02/10/2008	160	104.32	31.17	70	20.1	81	107.09	38.24	64	9.15	91
03/10/2008	161	107.41	30.13	72	17.72	84	108.98	39.06	64	16.38	85
06/10/2008	164	109.93	33.53	69	19.73	82	109.02	38.66	65	15.77	86
09/10/2008	167	108.81	30.83	72	18.87	83	109.3	34.03	69	16.03	85
13/10/2008	171	107.61	30.27	72	19.27	82	112.02	38.41	66	12.7	89
16/10/2008	174	105.72	32.7	69	21.15	80	109.96	37.6	66	14.55	87
20/10/2008	178	116.03	31.3	73	20.26	83	112.25	40.2	64	11.24	90
22/10/2008	180	107.63	33.36	69	19.36	82	110.4	36.8	67	12.6	89
24/10/2008	182	107.9	30.58	72	18.6	83	112.74	35.04	69	13.81	88
27/10/2008	185	108.64	32.08	70	18.56	83	112.24	33.73	70	14.48	87
04/11/2008	193	107.65	35.15	67	17.6	84	112.36	35.45	68	13.21	88
06/11/2008	195	108.45	33.12	69	18.01	83	113.23	33.82	70	13.52	88

pH									
Fecha	Días de operación	Agua residual cruda con aditivos	Influyente oxidación con aditivos	Influyente biofiltro con aditivos	Efluente biofiltro con aditivos	Agua residual cruda sin aditivos	Influyente oxidación sin aditivos	Influyente biofiltro sin aditivos	Efluente biofiltro sin aditivos
		U de pH	U de pH	U de pH	U de pH	U de pH	U de pH	U de pH	U de pH
25/04/2008	1	10.81	2.3	7.17	7.34	7.95	2.65	7.6	6.79
29/04/2008	4	10.82	2.32	6.97	7.06	7.59	2.66	7.22	7.19
01/05/2008	6	10.8	2.35	6.95	8.34	7.47	2.675	6.9	7.33
02/05/2008	7	10.67	2.64	7.21	8.21	7.59	2.82	7.22	7.21
05/05/2008	10	10.7	2.93	6.95	7.83	7.86	2.965	6.89	7.61
06/05/2008	11	10.69	2.82	7.11	7.78	7.46	2.91	7.32	7.28
07/05/2008	12	10.63	2.55	6.97	7.42	7.81	2.775	6.58	7.11
12/05/2008	17	10.56	2.94	7.06	7.55	7.65	2.97	7.49	7.2
14/05/2008	19	10.75	3.06	6.31	7.87	8.1	3.03	6.31	7.88
15/05/2008	20	10.71	2.8	6.25	7.8	7.87	2.9	6.72	7.66
16/05/2008	21	10.71	3.04	6.63	7.92	7.72	3.02	6.63	7.25
19/05/2008	24	10.55	3.04	5.99	7.8	7.89	3.02	6.61	7.79
20/05/2008	25	10.54	3	6.03	7.91	7.68	3	6.6	7.5
21/05/2008	26	10.54	3.03	6.38	7.9	7.73	3.015	6.73	7.91
25/05/2008	30	10.36	2.97	6.36	7.77	7.56	2.985	7.17	7.54
26/05/2008	31	10.59	2.99	6.28	7.7	7.7	2.995	6.74	7.65
27/05/2008	32	10.61	3.01	6.44	7.79	7.66	3.005	7.12	7.45
29/05/2008	34	10.56	2.98	6.2	7.7	7.63	2.99	6.65	7.5
30/05/2008	35	10.58	3.01	6.13	7.75	7.81	3.005	6.72	8.2
04/06/2008	40	10.63	3	6.17	7.65	7.87	3	6.5	7.85
08/06/2008	44	10.59	3.03	6.26	7.69	7.78	3.015	6.73	7.25
10/06/2008	46	10.59	3.03	6.57	7.84	7.91	3.015	7.07	7.77
11/06/2008	47	10.6	2.98	6.35	7.79	7.38	2.99	6.78	7.62
16/06/2008	52	10.57	3.04	6.45	7.53	7.48	3.02	6.91	7.1
20/06/2008	56	10.61	2.98	6.25	7.83	7.57	2.99	7.23	8.01
26/06/2008	62	10.63	3.03	6.96	7.82	7.46	3.015	7.09	7.25
07/07/2008	73	10.67	2.97	7.09	7.71	7.37	2.985	6.9	6.73
08/07/2008	74	10.39	3.01	6.18	7.94	7.5	3.005	7.13	7.13

09/07/2008	75	10.6	2.99	6.12	7.84	7.41	2.995	7.15	6.93
28/07/2008	94	10.66	3	6.42	7.82	7.49	3	6.69	6.97
30/07/2008	96	10.76	3.05	6.55	7.77	7.43	3.025	6.5	6.98
01/08/2008	98	10.46	2.96	6.42	7.99	7.54	2.98	6.64	7.32
13/08/2008	110	10.68	2.98	6.69	7.93	7.62	2.99	6.49	6.77
14/08/2008	111	10.68	3.05	7.26	7.7	7.8	3.025	6.93	7.97
15/08/2008	112	10.58	3.04	7.2	7.98	7.86	3.02	7.3	7.49
21/08/2008	118	10.37	3.01	7.08	7.97	7.6	3.005	7.16	7.43
05/09/2008	133	10.37	2.99	6.79	7.93	7.41	2.995	7.24	7.58
07/09/2008	135	10.29	3.01	6.56	7.92	7.36	3.005	7.14	7.44
09/09/2008	137	10.24	2.98	6.76	7.85	7.83	2.99	7.36	7.74
10/09/2008	138	10.19	3.05	6.46	7.88	7.49	3.025	6.87	7.48
11/09/2008	139	10.21	3.04	6.86	7.86	7.66	3.02	7.49	7.75
15/09/2008	143	10.37	3	6.53	7.64	7.71	3	7.02	7.47
17/09/2008	145	10.39	2.99	6.7	7.69	7.82	2.995	7.54	7.77
19/09/2008	147	10.34	3.03	6.76	7.68	7.65	3.015	7.29	7.3
24/09/2008	152	10.76	2.96	6.81	7.63	7.82	2.98	7.25	7.32
26/09/2008	154	10.34	3.03	6.82	7.66	7.81	3.015	7.55	7.6
29/09/2008	157	10.24	2.97	6.9	7.58	7.74	2.985	7.08	7.51
01/10/2008	159	10.28	2.91	6.78	7.62	7.83	2.955	6.79	7.09
02/10/2008	160	10.27	2.78	7.16	7.59	7.65	2.89	6.57	7.01
03/10/2008	161	10.26	2.95	6.79	7.4	7.34	2.975	6.37	6.9
06/10/2008	164	10.42	3	6.68	7.35	7.05	3	6.94	6.86
09/10/2008	167	10.31	3.01	6.71	7.49	7.33	3.005	6.39	7.16
13/10/2008	171	10.29	3.1	6.67	7.41	7.33	3.05	6.68	7.44
16/10/2008	174	10.65	3.28	6.58	7.4	7.71	3.14	7.25	7.55
20/10/2008	178	10.29	2.73	6.3	7.31	7.58	2.865	6.31	7.25
22/10/2008	180	10.35	2.86	6.13	7.36	7.3	2.93	6.19	7.03
24/10/2008	182	10.39	2.93	6.36	7.36	7.45	2.965	6.57	7.13
27/10/2008	185	10.63	2.99	6.87	7.7	7.51	2.995	7.23	7.22
04/11/2008	193	10.53	3	6.85	7.5	7.46	3	7.01	7.16
06/11/2008	195	10.57	2.95	6.91	7.6	7.43	2.975	6.75	7.14

Conductividad eléctrica (CE)							
Fecha	Días de operación	Agua residual cruda con aditivos	Influyente biofiltro con aditivos	Efluyente biofiltro con aditivos	Agua residual cruda sin aditivos	Influyente biofiltro sin aditivos	Efluyente biofiltro sin aditivos
		mS/cm ²	mS/cm ²	mS/cm ²	mS/cm ²	mS/cm ²	mS/cm ²
25/04/2008	1	27.3	27.7	16.97	0.39	0.541	5.6
29/04/2008	4	27.4	28.2	21.5	0.31	0.452	5.32
01/05/2008	6	27.5	28.1	21.8	0.317	0.549	5.18
02/05/2008	7	27.2	28.3	22.6	0.31	0.452	4.36
05/05/2008	10	27.8	23.4	25.6	0.315	0.471	3.27
06/05/2008	11	27.9	28.7	25.8	0.315	0.463	2.55
07/05/2008	12	27.8	28.9	28.7	0.313	0.678	1.704
12/05/2008	17	28.1	29	29.6	0.318	0.414	1.833
14/05/2008	19	17.18	22.2	29.9	0.209	0.679	1.145
15/05/2008	20	15.26	22.2	29.7	0.317	0.521	1.157
16/05/2008	21	17.38	18.21	28.6	0.209	0.519	1.086
19/05/2008	24	15	16.06	22.2	0.319	0.516	1.018
20/05/2008	25	14.88	16.08	20.8	0.31	0.514	0.967
21/05/2008	26	15.04	15.74	19.96	0.308	0.502	0.951
25/05/2008	30	14.99	15.51	18.51	0.31	0.553	0.902
26/05/2008	31	15.1	15.56	18.85	0.313	0.575	0.903
27/05/2008	32	15.09	15.58	18.76	0.312	0.577	0.89
29/05/2008	34	15.16	15.79	18.83	0.314	0.611	0.939
30/05/2008	35	15.04	15.62	18.64	0.312	0.611	0.946
04/06/2008	40	14.15	14.76	17.9	0.297	0.466	0.883
08/06/2008	44	14.17	14.77	17.33	0.299	0.455	0.895
10/06/2008	46	14.25	15.46	17.79	0.298	0.448	0.86
11/06/2008	47	14.22	13.88	17.02	0.295	0	0.794
16/06/2008	52	14.23	14.63	17.2	0.295	0.536	1.087
20/06/2008	56	13.72	14.13	16.79	0.285	0.653	1.07
26/06/2008	62	14.79	15.04	17.57	0.473	0.645	0.984
07/07/2008	73	14.36	14.97	16.9	0.409	0.773	1.123
08/07/2008	74	14.19	14.86	16.81	0.412	0.653	1.355
09/07/2008	75	14.52	15.7	17.68	0.429	0.712	1.184
28/07/2008	94	14.1	14.98	16.44	0.402	1.359	1.496
30/07/2008	96	14.02	14.99	16.51	0.406	1.315	1.502
01/08/2008	98	13.86	14.66	15.74	0.401	1.408	1.478
13/08/2008	110	14.58	14.92	15.79	0.395	1.231	1.534

14/08/2008	111	15.14	15.16	15.86	0.397	1.266	1.469
15/08/2008	112	14.56	15.11	15.95	0.4	1.276	1.463
21/08/2008	118	14.67	14.35	15.05	0.38	1.238	1.414
05/09/2008	133	14.92	14.66	15.67	0.39	1.261	1.443
07/09/2008	135	14.57	15.04	14.82	0.393	1.309	1.505
09/09/2008	137	14.81	14.27	14.56	0.377	1.052	1.443
10/09/2008	138	14.67	15.13	15.3	0.385	1.09	1.497
11/09/2008	139	14.46	15.01	15.62	0.4	1.106	1.506
15/09/2008	143	15.79	16.69	16.98	0.417	1.151	1.563
17/09/2008	145	15.39	16.4	16.78	0.411	1.15	1.483
19/09/2008	147	14.97	16.7	16.14	0.397	1.112	1.461
24/09/2008	152	15.61	15.95	16.68	0.357	0.997	1.164
26/09/2008	154	14.76	15.54	15.07	0.349	0.893	1.047
29/09/2008	157	14.57	15.56	14.97	0.385	0.99	1.191
01/10/2008	159	14.56	15.61	15.77	0.395	0.946	1.138
02/10/2008	160	14.55	15.36	15.61	0.358	1.158	1.303
03/10/2008	161	14.67	15.25	15.86	0.584	1.892	1.806
06/10/2008	164	14.62	15.29	15.62	0.451	1.271	1.806
09/10/2008	167	14.67	15.45	15.63	0.389	1.778	1.494
13/10/2008	171	14.7	15.27	15.85	0.352	1.898	1.66
16/10/2008	174	14.48	15.29	15.73	0.355	1.895	1.759
20/10/2008	178	14.86	15.34	15.8	0.376	1.319	1.782
22/10/2008	180	14.51	15.36	15.83	0.343	1.31	1.55
24/10/2008	182	14.03	15.63	15.91	0.321	1.005	1.369
27/10/2008	185	14.59	15.13	15.86	0.318	1.02	1.291
04/11/2008	193	14.49	15.25	15.85	0.321	1.05	1.351
06/11/2008	195	14.51	15.37	15.86	0.325	1.03	1.39

Sólidos disueltos totales (SDT)							
Fecha	Días de operación	Agua residual cruda con aditivos	Influyente biofiltro con aditivos	Efluente biofiltro con aditivos	Agua residual cruda sin aditivos	Influyente biofiltro sin aditivos	Efluente biofiltro sin aditivos
		[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]	[g/L]
25/04/2008	1	16.14	16.37	9.61	0.1880	0.2620	3.1000
29/04/2008	4	16.18	17.30	12.43	0.1498	0.2180	2.9500
01/05/2008	6	16.21	16.64	12.58	0.1523	0.2660	2.7200
02/05/2008	7	16.07	16.77	13.13	0.1498	0.2180	2.2700
05/05/2008	10	16.42	13.63	15.02	0.1512	0.2680	1.6810
06/05/2008	11	16.49	17.01	15.20	0.1513	0.2240	1.2930
07/05/2008	12	16.42	17.18	17.01	0.1505	0.3300	0.8500
12/05/2008	17	16.66	17.22	17.60	0.1527	0.1998	0.6860
14/05/2008	19	9.75	12.69	17.82	0.1001	0.3300	0.5640
15/05/2008	20	8.58	12.89	17.66	0.1523	0.2530	0.5700
16/05/2008	21	9.86	10.38	16.97	0.0998	0.2510	0.5340
19/05/2008	24	8.42	9.06	12.88	0.1535	0.2500	0.5000
20/05/2008	25	8.35	9.07	12.00	0.1491	0.2490	0.4740
21/05/2008	26	8.44	8.87	11.46	0.1483	0.2430	0.4660
25/05/2008	30	8.41	8.73	10.56	0.1491	0.2680	0.4410
26/05/2008	31	8.48	8.76	10.77	0.1503	0.2790	0.4420
27/05/2008	32	8.47	8.77	10.72	0.1498	0.2800	0.4360
29/05/2008	34	8.51	8.89	10.76	0.1508	0.2960	0.4600
30/05/2008	35	8.49	8.80	10.64	0.1500	0.2960	0.4630
04/06/2008	40	7.91	8.27	10.15	0.1427	0.2250	0.4320
08/06/2008	44	7.93	8.28	9.83	0.1438	0.2200	0.4380
10/06/2008	46	7.96	8.70	10.11	0.1430	0.2160	0.4210
11/06/2008	47	7.95	7.75	9.65	0.1418	0.2380	0.3880
16/06/2008	52	7.95	8.20	9.75	0.1416	0.2600	0.5350
20/06/2008	56	7.65	7.90	9.63	0.1370	0.3180	0.5260
26/06/2008	62	8.29	8.44	9.98	0.2290	0.3140	0.4830
07/07/2008	73	8.04	8.40	9.57	0.1974	0.3770	0.5530
08/07/2008	74	7.93	8.33	9.52	0.1987	0.3180	0.6710
09/07/2008	75	8.13	8.85	8.40	0.2070	0.3470	0.5840
28/07/2008	94	7.88	8.41	9.29	0.1939	0.6730	0.7430
30/07/2008	96	7.83	8.40	9.34	0.1959	0.6510	0.7460
01/08/2008	98	7.73	8.22	8.87	0.1937	0.6980	0.7340
13/08/2008	110	8.17	8.37	8.90	0.1915	0.6080	0.7630
14/08/2008	111	8.53	8.52	8.94	0.1912	0.6250	0.7290
15/08/2008	112	8.15	8.49	8.99	0.1929	0.6310	0.7260
21/08/2008	118	7.62	8.03	8.95	0.1831	0.6110	0.7010

05/09/2008	133	7.76	8.21	9.02	0.1883	0.6230	0.7160
07/09/2008	135	8.16	8.45	8.31	0.1895	0.6470	0.7480
09/09/2008	137	7.70	7.99	8.15	0.1818	0.5170	0.7160
10/09/2008	138	8.23	8.49	8.60	0.1858	0.5360	0.7440
11/09/2008	139	8.09	8.43	8.79	0.1928	0.5440	0.7480
15/09/2008	143	8.89	9.45	9.63	0.2010	0.5670	0.7780
17/09/2008	145	9.86	9.27	9.51	0.1985	0.5670	0.7370
19/09/2008	147	9.86	9.27	9.51	0.1973	0.4470	0.5740
24/09/2008	152	9.20	9.64	9.90	0.1989	0.4900	0.5740
26/09/2008	154	9.28	9.39	9.46	0.1880	0.4370	0.5740
29/09/2008	157	9.16	9.34	9.80	0.1854	0.4860	0.7900
01/10/2008	159	9.19	9.78	9.96	0.1932	0.4640	0.5630
02/10/2008	160	9.19	9.73	9.32	0.1822	0.4240	0.6440
03/10/2008	161	8.22	8.57	8.94	0.2840	0.9480	0.9040
06/10/2008	164	8.19	8.59	8.79	0.2180	0.6280	0.9040
09/10/2008	167	8.22	8.69	8.80	0.1875	0.8890	0.7420
13/10/2008	171	8.24	8.58	8.93	0.1694	0.9510	0.8280
16/10/2008	174	8.10	8.60	8.86	0.1711	0.9500	0.8770
20/10/2008	178	8.33	9.21	8.90	0.1813	0.6520	0.8910
22/10/2008	180	8.21	8.86	8.88	0.1673	0.6500	0.7800
24/10/2008	182	8.24	8.60	8.82	0.1549	0.4930	0.6780
27/10/2008	185	8.18	8.48	8.94	0.1532	0.5020	0.6380
04/11/2008	193	8.24	8.58	8.88	0.1525	0.5150	0.6480
06/11/2008	195	8.26	8.63	8.91	0.1569	0.5410	0.6860

Salinidad							
Fecha	Días de operación	Agua residual cruda con aditivos	Influyente biofiltro con aditivos	Efluente biofiltro con aditivos	Agua residual cruda sin aditivos	Influyente biofiltro sin aditivos	Efluente biofiltro sin aditivos
		%	%	%	%	%	%
25/04/2008	1	16.8	17.0	10.0	0.1	0.2	3.5
29/04/2008	4	16.8	17.3	12.9	0.1	0.2	3.1
01/05/2008	6	16.8	17.3	13.1	0.1	0.2	2.8
02/05/2008	7	16.7	17.4	13.6	0.1	0.2	2.3
05/05/2008	10	17.1	14.3	15.6	0.1	0.2	1.7
06/05/2008	11	17.1	17.7	15.7	0.1	0.2	1.3
07/05/2008	12	17.1	17.8	17.7	0.1	0.2	0.8
12/05/2008	17	17.3	17.9	18.3	0.1	0.1	0.7
14/05/2008	19	10.1	13.3	18.5	0.0	0.3	0.5
15/05/2008	20	8.9	13.4	18.3	0.1	0.2	0.5
16/05/2008	21	10.2	10.7	17.6	0.0	0.2	0.5
19/05/2008	24	8.7	9.4	13.4	0.1	0.2	0.5
20/05/2008	25	8.6	9.4	12.5	0.1	0.2	0.5
21/05/2008	26	8.7	9.2	11.9	0.1	0.2	0.4
25/05/2008	30	8.7	9.0	10.9	0.1	0.2	0.4
26/05/2008	31	8.8	9.1	10.8	0.1	0.2	0.4
27/05/2008	32	8.5	8.8	10.7	0.1	0.2	0.4
29/05/2008	34	8.9	9.2	11.1	0.1	0.3	0.4
30/05/2008	35	8.7	9.1	11.0	0.1	0.3	0.4
04/06/2008	40	8.2	8.6	10.5	0.1	0.2	0.4
08/06/2008	44	8.2	8.6	10.2	0.1	0.2	0.4
10/06/2008	46	8.2	9.0	10.5	0.1	0.2	0.4
11/06/2008	47	8.2	8.0	10.0	0.1	0.2	0.4
16/06/2008	52	8.2	8.5	10.1	0.1	0.2	0.5
20/06/2008	56	7.9	8.2	10.0	0.1	0.3	0.5
26/06/2008	62	8.6	8.7	10.3	0.2	0.3	0.5
07/07/2008	73	8.3	8.7	9.9	0.2	0.3	0.5
08/07/2008	74	8.2	8.6	9.9	0.2	0.3	0.7
09/07/2008	75	8.4	9.2	10.1	0.2	0.3	0.6
28/07/2008	94	8.2	8.7	8.6	0.2	0.7	0.7
30/07/2008	96	8.1	8.7	9.7	0.2	0.6	0.7
01/08/2008	98	8.0	8.5	9.2	0.2	0.7	0.7
13/08/2008	110	8.4	8.7	9.2	0.1	0.6	0.7

14/08/2008	111	8.8	8.8	9.2	0.1	0.6	0.7
15/08/2008	112	8.4	8.8	8.9	0.1	0.6	0.7
21/08/2008	118	7.9	8.3	8.7	0.1	0.6	0.7
05/09/2008	133	8.0	8.5	8.5	0.1	0.6	0.7
07/09/2008	135	8.4	8.7	8.6	0.1	0.6	0.7
09/09/2008	137	8.0	8.3	8.4	0.1	0.5	0.7
10/09/2008	138	8.5	8.8	8.9	0.1	0.5	0.7
11/09/2008	139	8.4	8.7	9.1	0.1	0.5	0.7
15/09/2008	143	9.2	9.8	9.7	0.1	0.5	0.8
17/09/2008	145	10.2	9.8	9.6	0.1	0.5	0.7
19/09/2008	147	9.4	9.9	9.2	0.1	0.4	0.5
24/09/2008	152	9.1	9.3	9.8	0.0	0.5	0.5
26/09/2008	154	9.3	9.4	9.3	0.1	0.4	0.5
29/09/2008	157	9.0	9.2	9.1	0.1	0.5	0.5
01/10/2008	159	9.4	9.0	9.1	0.0	0.4	0.5
02/10/2008	160	9.4	8.9	9.2	0.1	0.6	0.6
03/10/2008	161	8.5	8.9	9.3	0.3	0.9	0.9
06/10/2008	164	8.5	8.9	9.1	0.2	0.6	0.9
09/10/2008	167	8.5	9.0	9.1	0.1	0.9	0.7
13/10/2008	171	8.5	8.9	9.2	0.1	0.9	0.8
16/10/2008	174	8.4	8.9	9.2	0.1	0.9	0.9
20/10/2008	178	8.6	9.6	9.2	0.1	0.6	0.9
22/10/2008	180	8.5	9.1	9.2	0.1	0.6	0.8
24/10/2008	182	8.5	8.9	9.1	0.1	0.5	0.7
27/10/2008	185	8.5	9.0	9.3	0.1	0.5	0.6
04/11/2008	193	8.5	9.1	9.2	0.1	0.6	0.7
06/11/2008	195	8.5	9.0	9.2	0.1	0.5	0.7

12.- BIBLIOGRAFÍA

- Acero J. L., Benítez F. J., Real F. J. and Leal A. I. (2001). *Degradation of p-hydroxyphenylacetic acid by photoassisted Fenton reaction. Water Science and Technology, Vol. 44 No. 5 pp 31-38.*
- Al Momani F., Gonzalez O., Sans C. and Espulgas S. (2004). *Combining photo-Fenton process with biological sequencing batch reactor for 2,4-dichlorophenol degradation. Water Science and Technology. Vol. 49 No. 4 pp 293-298*
- Anónimo (2002). *Consulta electrónica a redes internacionales. Dirección electrónica: <http://www.chm.bris.ac.uk/webprojects2002/price/colour.htm>*
- APHA AWWA WEF (1998), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20Ed. Washington, USA.*
- Aplin R. and Waite T. D. (2000). *Comparison of three advanced oxidation processes for degradation of textile dye. Water Science and Technology, Vol. 42 No. 5-6 pp 345-354.*
- Aplin R., Feitz A. J., and Waite T. D. (2001). *Effect of Fe(III)-ligand properties on effectiveness of modified photo-Fenton processes. Water Science and Technology, Vol. 44 No. 5 pp23-30.*
- Aris A., Md Din M. F., Salim M. R., Yunus S. and Abu Bakar W. A. (2002). *Influence of varying conditions in the degradation of azo dye using immobilized TiO₂ photocatalyst. Water Science and Technology Vol. 46 No. 9 pp 255-262.*
- Arslan I. and Akmehmet Balcioğlu I. (1999). *Oxidative Treatment of simulated dyehouse effluent by UV and Near-UV light assisted Fenton's reagent. Chemosphere, Vol. 39 No. 15, pp 2767-2783.*
- Bacardit J., García-Molina V., Bayarri B., Giménez J., Chamarro E., Sans C. and Espulgas S. (2007). *Coupled photochemical-biological system to treat biorecalcitrant wastewater. Water Science and Technology, vol. 55 No. 12 pp 95-100.*
- Bandala E. R., Peláez M. A., Dionysiou D. D., Gelover S., García J., Macías . (2006). *Degradation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) using cobalt-*

- peroxymonosulfate in Fenton-like process. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 186: 357-363.
- Castillo M. G. (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas, International Development Research Centre. IDRC/IMTA ISBN 9-68553-633-3*
- Chacón Castillo J. M., Moeller Chávez G. E. y Cervantes Quiroz A. L. (2007). *Decoloración, oxidación y reducción de toxicidad de un cóctel de colorantes tipo Azo por procesos de oxidación avanzada. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Panamá, Noviembre 2007*
- Chacon J.M., Leal M.T., Sánchez M. Bandala R.E. (2006). *Solar Photocatalytic degradation of azo-dyes by photo-Fenton process. Elsevier, Dyes and pigments No. 69 pp 144-150.*
- Chen J. J., McCarty D., Slack D. and Rundle H. (2000). *Full scale case studies of a simplified aerated filter (BAF) for organics and nitrogen removal. Water Science and Technology, Vol. 41 No. 4-5 pp 1-4.*
- Domènech X., Jardim F. y Litter M. (2001). *Procesos Avanzados de oxidación para la Eliminación de Contaminantes. Texto colectivo elaborado por la Red CYTED VIII-G. Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires Argentina.*
- Dubé R., Buelna G., Bellemare G. (2000). *Traitement des effluents liquides d'une industrie d'abattage de volailles par le procédé de biofiltration BIOSOR^{MC} pour un rejet au milieu naturel. Salon des technologies environnementales du Québec. Réseau Environnement. Saint-Hyacinthe, Québec, Canada.*
- Elhadi S. L. N., Huck P. M. and Slawson R. M. (2004). *Removal of geosmin and 2-methylisoborneol by biological filtration, Water Science and Technology Vol. 49 No. 9 pp 273-280.*
- Estrada A. E. y García S. L. (2004). *Biodegradación del 1,2-dicloroetano de aguas residuales de la industria petroquímica por biofiltración sobre medio orgánico. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.*

- Fung P. C., Poon C. S., Chu C. W. and Tsui S. M. (2001). *Degradation Kinetics of reactive Dye by UV/H₂O₂/US process under continuous mode operation. Water Science and Technology, Vol. 44 No. 6 pp 67-72.*
- García S. L. (2007). *Decoloración fúngica de efluentes industriales con colorantes azo en sistemas de biofiltración con diferentes empaques orgánicos. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.*
- Garzón-Zúñiga M. A., Lessard P., Aubry G. and Buelna G. (2007). *Aeration effect on the efficiency of swine manure treatment in a trickling filter packed with organic materials, Water Science and Technology Vol. 55 No. 10 pp 135-143.*
- Garzón-Zúñiga M. A., Lessard P., Buelna G. (2002). *Tratamiento de aguas residuales de granja de puerco por biofiltración aireada sobre cama de turba. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México.*
- Garzón-Zúñiga M. A., Moeller Chávez G., Buelna G., Tremblay M. L. (2006). *Biofiltración sobre materiales orgánicos de regiones tropicales y subtropicales: Proyecto de colaboración IMTA-CRIQ; Informe final de proyecto IMTA-TC0512.4.*
- Gutierrez G., Valette J., Guillard Ch., Païse O., Faure R. (2001). *Photocatalysed degradation of cyromazine in aqueous titanium dioxide suspensions: comparison with photolysis. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 141: 79-84*
- Hernández Hernández Y. S. y Moeller Chávez G. E. (2008). *Tratamiento de aguas residuales de la industria de azocolorantes por medio de un proceso biológico combinado. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). XXXI Congreso Interamericano AIDIS. Santiago de Chile. Octubre 2008.*
- Hihara T. and Takahashi Y. (1998). *Red reactive dyes their compositions and dyeing method employing them, United States Patent No. 5,756,690.*

- Irvine R. L. and Moe W. M. (2001). *Peiod biofilter operation for enhanced performance during unsteady-state loading conditions, Water Science and Technology, Vol. 43 No. 3 pp 231- 239*
- Kijowska E., Leszczynska M. and Sozanski M. M. (2001). *Metabolic activity test in investigation of biodegradation in biological filters, Water Science and Technology. Water Supply Vol. 1 No.2 pp 151-158.*
- Krull R., Hemmi M., Otto P. and Hempel D. C. (1998). *Combined biological and chemical treatment of highly concentrated residual dyehouse liquors. Water Science and Technology, vol. 38 No. 4-5 pp 339-346.*
- Lai B. and Yeh J. (2001). *Yellow reactive dye composition, United States Patent No. 6,203,581 B1.*
- Lesson G. and Smith J. B. (1997). *Petroleum environmental research forum field study on biofilters for control of volatile hydrocarbons. Journal of Environmental Engineering, Vol. 123, No. 6 pp 556-562.*
- Mansilla H., Lizama C., Gutarra A., Rodríguez J. (2001). *Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil. Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina. Consulta electrónica a redes internacionales. Dirección electrónica: www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/CYTED/20cap13.pdf*
- Möbius C. H. and Helble A. (2004). *Combined ozonation and biofilm treatment for reuse of papermill wastewaters, Water Science and Technology, Vol. 49 No. 4, pp 319-323.*
- Moeller Chávez G. E. and Tomasini Ortiz A. C. (2008). *Sequenced Anaerobic-Aerobic Suspended Growth Reactors Treating Azo Dyes. World Water Exhibition and Congress. Viena 2008*
- Moeller Chávez G.E., Garzón-Zúñiga Marco A., Tomasini Ortiz A.C., Chacón Castillo J.M., Gómez Navarrete A. y Sandoval Villasaña A.M. (2007). *Decoloración y reducción de toxicidad de efluentes de industria química de colorantes y pigmentos. CNA-2000-C01-70. Fondo Sectorial para Investigación y Desarrollo Sobre el Agua. CNA-CONACYT. México 2007*
- Moeller G. E., Garzón-Zúñiga M. A. (2003). *Desarrollo de tecnologías no convencionales para el tratamiento de efluentes de la fabricación de colorantes del tipo azo. Anuario IMTA 2003, pp 77-85*

- Nicolai R. E. and Janni K. A. (2001). *Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors*, *Water Science and Technology*, Vol. 44 No. 9 pp 261-267.
- Oller I., Malato S., Sánchez-Pérez J. A., Maldonado M. I., Gernjak W. and Pérez-Estrada L. A. (2007). *Advanced oxidation process-biological system for wastewater containing a recalcitrant pollutant*. *Water Science and Technology*, Vol. 55 No. 12 pp 229-235
- Parra S., Malato S., Blanco J., Péringer P. and Pulgarin C. (2001). *Concentrating versus non-concentrating reactors for solar photocatalytic degradation of p-nitrotoluene-o-sulfonic acid*. *Water Science and Technology*, Vol. 44 No. 5 pp 219-227.
- Pujol R., Lemmel H. and Gousailles M. (1998). *A keypoint of nitrification in an upflow biofiltration reactor*. *Pergamon Water Science and Technology* Vol. 38 No. 3 pp 43-49.
- Qi B., Moe M. W. and Kerry A. K. (2005). *Treatment of paint spray booth off-gases in a fungal biofilter*, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131 No. 2 pp 180-189.
- Ramírez C. E., Garzón Z. M. A., Sandoval Y. L., Pica G. Y., Moeller Ch. G., Mijaylova N. P., Bandala M. E., Cardoso V. L., Gómez N. A., García R. J. and Escalante E. V. (2005). *Aerobic Treatability and toxicity of petrochemical wastewater*. *Proceedings of IWA, International Conference on Sustainable Development of Chemical Industries with the Environment*. Tsukuba, Japan.
- Rodríguez M., Abderrazik B., Contreras S., Chamarro E., Giménez J., Esplugas S. (2002). *Iron (III) photooxidation of organic compounds in aqueous solutions*. *Applied Catalysis B: Environmental* 37 pp 131-137
- Rodríguez M., Kirchner A., Contreras S., Chamarro E., Esplugas S. (2000). *Influence of H₂O₂ and Fe (III) in the photodegradation of nitrobenzene*. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 133: 123-127
- Rodríguez M., Sarria V., Esplugas S., Pulgarin C. (2002). *Photo-Fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: biodegradability of the photo-treated solution*. *Journal of photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 151: 129-135

- Sarria V., Parra S., Invernizzi M., Péringer P. and Pulgarin C. (2001). *Photochemical-Biological treatment of a real industrial biorecalcitrant wastewater containing 5-amino-6-methyl-2-benzimidazolone. Water Science and Technology, Vol. 44 No.5 pp93-101.*
- Sorial A. G., Smith L. F., Suidan T. M., Pandit A., Biswas P. and Brenner C. R. (1997). *Evaluation of trickle bed air biofilter performance for BTEX removal, Journal of Environmental Engineering, Vol. 123 No. 6.*
- Xu Y., Lu H. (2000). *Degradation of the dye X-3B by UV/Fe (III)-generated hydroxyl radicals in aqueous solution. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 136: 73-77*
- Yeh M., Chang T., Lee S. and Yin D (2000). *Mixtures of symmetrical and unsymmetrical red reactive dyes, United States Patent, No. 6,068,667.*
- Yoon J., Kim S., Lee D. S. and Huh J. (2000). *Characteristics of p-chlorophenol degradation by Photo-Fenton oxidation. Water Science and Technology Vol. 42 No. 3-4 pp 219-224.*
- Zissi U. and Lyberatos G. (1996). *Azo-dye biodegradation under anoxic conditions. Water Science and Technology, Vol. 34 No. 5-6 pp 495-500.*