



Universidad Autónoma del Estado de México  
Facultad de Planeación Urbana y Regional



## **Fitorremediación para la extracción del colorante “azul de metileno” mediante el uso de *Eichhornia crassipes*.**

TESIS

Que para obtener el título de  
Licenciada en Ciencias Ambientales

Presenta:

Lizbeth Lara González

Director de tesis:

Dr. en C.A. Eduardo Campos Medina

Toluca de Lerdo, Estado de México; Agosto de 2017

## RESUMEN

Debido a la problemática ambiental generada por las aguas residuales contaminadas con colorantes, esta investigación tiene como objetivo identificar las concentraciones máximas y mínimas de colorante que la *Eichhornia crassipes* puede absorber a través de la fitorremediación.

La fitorremediación consiste en absorber, retener, degradar o transformar contaminantes orgánicos e inorgánicos a través de las plantas para depurar aguas residuales. La vegetación acuática ha demostrado ser una de las más eficientes, especialmente las macrófitas como la *Eichhornia crassipes* (Jacinto de Agua), ya que en diferentes investigaciones se ha comprobado que puede retener metales pesados, sólidos suspendidos y compuestos orgánicos.

Para cumplir el objetivo de esta investigación, se realizó un experimento dividido en 5 etapas: la primera consistió en la selección y adaptación del Jacinto de agua, la segunda fue la selección del colorante azul de metileno y preparación de las soluciones sintéticas del mismo a 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mg/L. Posteriormente, la tercera etapa consistió en la adición del colorante y de la especie vegetal a las peceras, seguido de la recolección de muestras tratadas en función del tiempo; a la par también se monitorearon los valores de pH. Finalmente, en la quinta etapa se realizaron los cálculos correspondientes de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), y la determinación del porcentaje de la remoción del colorante a través del análisis de las muestras en el equipo de espectrofotómetro de ultravioleta.

Los resultados obtenidos al término del experimento fueron, que en función del tiempo de tratamiento el Jacinto de agua presentó amarillamiento, pérdida de la epidermis, necrosis, y cambio de color en la raíz. Los valores de pH presentaron variaciones en dos tiempos: al principio de valor neutro (7.0) a uno ácido (5.9) y durante el experimento de ácido a alcalino (8.4) en todas las peceras. Los valores de la DQO disminuyeron proporcionalmente en función del tiempo de tratamiento; y finalmente el porcentaje de remoción de colorante fue del 94.98% a 10 mg/L, 85.5% en 20 y 30 mg/L, 50% en 40 y 50 mg/L y del 40% en 60 mg/L.

## Índice

Introducción.....	8
Planteamiento del problema.....	10
Justificación.....	12
Hipótesis.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15

### Capítulo I. Contaminación del Agua

1.1 Contaminación del agua.....	17
1.1.1 Contaminación hídrica en México.....	19
1.1.2 Clasificación de los contaminantes del agua.....	22
1.2 Colorantes artificiales.....	24
1.2.1 Definición y caracterización.....	24
1.2.2 Producción y comercialización.....	26
1.2.3 Clasificación de los colorantes.....	28
1.2.3.1 Colorantes básicos.....	35
1.2.3.2. Azul de metileno.....	36
1.3 Contaminación por colorantes.....	38
1.4 Tratamientos de aguas residuales.....	40
1.4.1 Definición y clasificación de tratamientos de aguas residuales.....	40

1.4.2 Tipos de tratamientos para aguas residuales contaminadas con colorantes.....	47
--	----

## **Capítulo II. Fitorremediación para el tratamiento de agua contaminada por colorantes**

2.1. Biorremediación.....	55
2.1.1 Definición y caracterización.....	55
2.1.2 Tipos de biorremediación.....	57
2.2 Fitorremediación.....	60
2.2.1 Definición y antecedentes.....	60
2.2.2 Tipos de fitorremediación.....	61
2.2.3 Ventajas y desventajas de la fitorremediación.....	64
2.2.4 Antecedentes de la fitorremediación para el tratamiento de agua...	66
2.3 Plantas Macrófitas.....	67
2.3.1 Descripción general.....	67
2.3.2 Especies macrófitas.....	69
2.3.3 Acción depuradora de las plantas acuáticas.....	71
2.3.4 Jacinto de agua ( <i>Eichhornia crassipes</i> ).....	72
2.3.4.1 Descripción.....	72
2.3.4.2 Ciclo de desarrollo.....	74
2.3.4.3 Campos de aplicación.....	74

### **Capítulo III.- Normatividad**

3.1 Normatividad aplicable a los colorantes.....	77
--	----

### **Capítulo IV. Metodología**

4.1 Planteamiento de la investigación.....	84
4.2 Desglose de actividades.....	86
4.2.1 Selección de la macrófita.....	86
4.2.2 Selección de peceras. ....	86
4.2.3 Preparación de soluciones sintéticas de Azul de Metileno.....	86
4.2.4 Preparación del diseño de los experimentos.....	87
4.2.5 Obtención de soluciones sintéticas del colorante en las peceras...	88
4.3 Recolección de muestras.....	89
4.3.1 Muestras iniciales.....	89
4.3.2 Monitoreo de variables.....	93
4.3.2.1 Determinación de pH.....	93
4.3.3 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	93
4.3.4 Disminución de colorante.....	93

## **Capítulo V.- Resultados**

5.1 Comportamiento físico de la planta durante la fase de adaptación y adición del colorante .....	96
5.2 Resultados de pH.....	99
5.3 Mecanismo de interacción del Azul de Metileno con la fase acuosa.....	102
5.4 Resultados de concentración del colorante Azul de Metileno.....	103
5.5 Resultado de los valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	109
5.6 Integración de resultados.....	120

## **Capítulo VI**

Conclusiones.....	123
-------------------	-----

<b>Anexos</b> .....	126
---------------------	-----

<b>Referencias</b> .....	130
--------------------------	-----

## **Dedicatorias**

A Dios, por estar conmigo en cada paso, por fortalecer mi corazón y por haber puesto en mi camino a las personas que fueron mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres Alberto y Carmen por darme la vida, por su apoyo, su amor incondicional y creer siempre en mí. Papás, gracias por darme una carrera para mi futuro.

A mi hermana Edith, por su compañía, comprensión y cariño manifestado en un sin fin de emociones.

A mi mejor amiga Mónica, por su amistad incondicional durante 11 años, por su cariño, comprensión y todas las asesorías telefónicas para exentar los exámenes.

A mi director de Tesis Dr. en C.A. Eduardo Campos, por haberme dado la oportunidad de recurrir a su conocimiento científico, y haberme tenido la paciencia necesaria para guiarme durante todo el desarrollo de la investigación.

A todos ustedes Gracias,

## Introducción

Hoy en día la contaminación del agua es un problema ambiental que se ha incrementado exponencialmente debido al creciente e incontrolado desarrollo industrial y urbano. Este crecimiento trae consigo la generación de sustancias contaminantes a los diferentes cuerpos de agua, por lo tanto la prioridad científica tiene como objetivo primordial el mejorar y desarrollar tecnologías sostenibles que permitan controlar y disminuir el deterioro de este recurso natural (Valero, 2006).

Con base en este escenario de contaminación el objetivo de las Ciencias Ambientales consiste en plantear alternativas para el diagnóstico, prevención y remediación de las problemáticas ambientales tomando en cuenta aspectos físicos, biológicos y sociales.

Bajo este tenor el caso de la contaminación del agua, la licenciatura en ciencias ambientales proporciona los conocimientos básicos para realizar esta investigación que fue de tipo experimental, estableciendo metas finales siguiendo el perfil del egresado de esta licenciatura que es: proponer un tratamiento viable para aguas residuales contaminadas con colorantes que sea de bajo costo, fácil operación y fácil mantenimiento.

Hoy en día, los colorantes artificiales son la materia prima para infinidad de actividades, debido a la facilidad que tienen para aplicarse en cualquier material, la solubilidad y la resistencia a cambios físicos en el ambiente. Pero desgraciadamente estas características también complican el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes.

De ahí que en este trabajo de investigación se exploró la posibilidad de remover un colorante artificial mediante el proceso de la fitorremediación, el cual se propone como un tratamiento eficaz y ambientalmente sustentable que consiste en degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, compuestos radioactivos y petroderivados; por medio de plantas cuyas capacidades

fisiológicas o bioquímicas permitan absorber, retener, degradar o transformar las sustancias a formas menos tóxicas (CERIDE, 2014).

Asimismo esta técnica puede utilizarse en diferentes especies de plantas; las macrófitas, por ejemplo, se han presentado como una posibilidad ambientalmente sustentable para la remediación de aguas residuales industriales (Valero, 2006), y de manera puntual uno de los contaminantes que estas especies vegetales pueden remover son los colorantes, (Anjaneyulu *et al.*, 2005 y Días, *et al.*, 2007).

La razón por la cual se realizó esta investigación, enfocada a remover un colorante artificial, es que el agua con colorantes tiene efectos adversos. Su presencia en la fauna acuática puede disminuir glóbulos rojos, peso corporal y órganos reproductores (Mathur *et al.*, 2003). En los humanos, la degradación de colorante en el tracto intestinal puede generar aminas alifáticas y aromáticas, altamente cancerígenas y mutagénicas (Wingrove y Caret, 1999). Esto dio la pauta para seleccionar el colorante azul de metileno como analito de estudio ya que es un colorante sintético, con estructuras moleculares aromáticas complejas que lo hace inerte y difícil de degradar en plantas de tratamiento y en el mismo ambiente natural (Bautista, 2011).

En cuanto a la técnica de remoción, México ya cuenta con investigaciones dedicadas al estudio o aplicación de la fitorremediación para tratar aguas residuales; sin embargo, son pocas las dirigidas a la extracción de contaminantes por medio de plantas acuáticas (específicamente el Jacinto de Agua). Por lo tanto, la presente investigación podrá ser tomada en cuenta como aportación, antecedente o guía para investigaciones futuras, relacionadas con el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes.

## Planteamiento del problema

En México el problema de contaminación en el agua cada día es más preocupante, ya que el continuo crecimiento de la población y el creciente desarrollo industrial, agrícola y comercial, demandan mayor cantidad de agua lo que ha provocado una sobreexplotación del recurso y la generación de grandes cantidades de aguas residuales (Piña, 2007).

Los contaminantes que conforman las aguas residuales industriales pueden clasificarse en dos tipos: orgánicos e inorgánicos. Los colorantes artificiales son contaminantes orgánicos, que se utilizan como medicamento en la acuicultura, así como también en la medicina, investigaciones, técnicas de laboratorio y para teñir infinidad de materiales en diferentes giros industriales. Por estas razones los colorantes artificiales son muy solicitados debido a la facilidad que tienen para aplicarse en cualquier tipo de material, a su alta solubilidad y porque son más resistentes que los colorantes naturales a los tratamientos térmicos, pH extremos, luz, etc. Sin embargo, las propiedades químicas que los hacen tan comerciales, también son las responsables de que estos compuestos sean altamente resistentes a la degradación natural y la inducida por el hombre (Colindres, 2010).

Por lo cual uno de los problemas más importantes originados por el uso de colorantes artificiales, es la falta de nuevos sistemas de depuración para aguas residuales contaminadas con colorantes; por lo que algunas industrias han tenido que verse en la necesidad de descargar sus aguas sin un tratamiento previo al alcantarillado o a los cuerpos de agua (CCM, 2015). Por esta razón el ámbito académico y de la investigación han desarrollado varias propuestas para su remoción, por ejemplo, tratamientos biológicos como la fitorremediación.

Actualmente se tiene registro de algunas investigaciones internacionales que han propuesto a la *Eichhornia crassipes*, como una especie saneadora, que se caracteriza por tener un sistema de raíces con microorganismos asociados a ellas, los cuales favorecen su acción depuradora. El Jacinto de agua también puede remover algunos compuestos orgánicos, como fenoles, ácido fórmico, colorantes o

pesticidas, incluso puede disminuir niveles de DBO (demanda biológica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), y sólidos suspendidos (Metcalf, Eddyinc, 1995).

En conclusión, los colorantes artificiales son compuestos químicos utilizados para un sinnúmero de actividades antropogénicas, pero también son compuestos difíciles de degradar que pueden llegar a afectar la vida de flora, fauna e incluso la del humano. Así pues, lo que se pretende realizar en esta tesis es proponer un tratamiento biológico basado en los principios de las Ciencias Ambientales; es decir, que permita disminuir la cantidad de colorante diluidos en los cuerpos de agua, que no represente un gasto excesivo para los generadores y que tampoco perjudique más de lo que pueda ayudar.

Por consiguiente, se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿El Jacinto de agua será capaz de disminuir más del 90% la concentración de colorante en el agua? ¿Este lirio ayudara a reducir los niveles de DQO? ¿Cuáles son las concentraciones máximas que la planta puede soportar para continuar con vida? a estas y otras interrogantes se tratara de dar respuesta a lo largo de la investigación.

## Justificación

El problema de contaminación del agua por la presencia de compuestos orgánicos llamados colorantes se ha incrementado en la última década. Pero ¿por qué ha tomado importancia este tipo de contaminación?, la respuesta se entiende analizando su naturaleza química. Los colorantes se definen como sustancias orgánicas fluorescentes que imparten color a una sustancia o sustrato incoloro, por medio de una absorción selectiva de luz (Moeller y Garzón, 2003).

Gracias a las moléculas orgánicas cromóforas que componen su estructura química, los colorantes son resistentes a la biodegradación y a los tratamientos, debido a los enlaces entre sus moléculas y su lentitud para oxidarse (AFIRM, 2013); se han convertido en un problema de contaminación ambiental que afecta a humanos, animales y plantas (Colindres, 2010).

Una vez que los colorantes tienen contacto con los efluentes, estos comienzan a producir gran variedad de reacciones químicas y procesos físicos que provocan la degradación del ambiente acuático. Por ejemplo, algunos colorantes al entrar en contacto con el agua se transforman en compuestos más peligrosos, como aminas aromáticas potencialmente cancerígenas (Piña, 2007).

Los colorantes también contribuyen al desequilibrio de sólidos suspendidos, carga iónica, toxicidad, concentración de oxígeno disuelto y color (Rodríguez, *et al.*, 2006). Cuando los cuerpos de agua adquieren color, automáticamente poseen una alta capacidad de bioacumulación y una baja velocidad de despolimerización, lo que provoca su acumulación en lagos y bahías, generando la disminución del oxígeno disuelto (DO) en el agua, la reducción del poder absorbente del agua y por ende una disminución en la actividad fotosintética de los organismos (Rodríguez, *et al.*, 2006).

Ejemplos de este escenario es el caso específico del colorante azul de metileno, se dice que es un colorante sintético con estructuras moleculares aromáticas complejas, que lo hace inerte y difícil de degradar en plantas de tratamiento, además

su degradación en el ambiente natural es lenta por lo que suele acumularse e incrementar su concentración en los distintos nichos ecológicos (Bautista, 2011).

Otro aspecto de la problemática ambiental que generan es que los colorantes se utilizan para análisis de laboratorio, investigaciones científicas, procesos en acuicultura, tratamientos médicos y por supuesto procesos industriales (Lannacone, 2007), de los cuales se generan residuos que se disuelven en fase acuosa. Asimismo entre las industrias que más colorantes utilizan se encuentran la textil, papelera, plásticos, alimenticia y cosmetológica (Banat, *et al.*, 1996; Robinson, *et al.*, 2001).

Debido a esta problemática, la eliminación de los colorantes en efluentes representa un desafío para los procesos de tratamiento en aguas residuales (Cortazar, 2009). El tratamiento mediante la fitorremediación es considerado como un sistema que ha logrado proporcionar un tratamiento integral, en el que no solo se remueve eficientemente el material orgánico y sólidos suspendidos, sino que también, puede ayudar a reducir nutrientes, sales disueltas, metales pesados y organismos patógenos (García, 2012).

El uso de la fitorremediación es una técnica efectiva, de bajo costo y representa un impacto ambiental mínimo o nulo respecto a otros métodos de descontaminación físicos y químicos (García, 2012). No obstante, a pesar de que en varios países primermundistas se ha demostrado que la fitorremediación es un tratamiento ambientalmente racional y económico, en México todavía no se promueve ni se aprovecha al máximo esta tecnología alterna.

Algunas universidades de México, se han interesado por el tema y han realizado investigaciones y tratamientos bajo condiciones controladas, sin embargo, no se ha encontrado alguna en la que se trate de eliminar el colorante por medio de la *Eichhornia Crassipes*; una especie de lirio acuático, económico, de fácil manipulación, dotado con propiedades taxonómicas capaces de remover diferentes contaminantes (Jaramillo, 2011).

Por lo tanto, lo que se pretende en esta tesis es investigar, analizar y determinar que el uso de la fitorremediación es una alternativa de tratamiento ambiental que pueden ayudar a depurar aguas contaminadas por colorantes.

## **Hipótesis**

A través de la implementación de la *Eichhornia crassipes*, la concentración del colorante azul metileno en fase acuosa disminuirá un 90%.

## **Objetivo general**

Disminuir el 90% la concentración del colorante utilizando Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), con la finalidad de cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

## **Objetivos específicos**

- Implementar y aclimatar la especie *Eichhornia crassipes* para el desarrollo del diseño de experimento.
- Preparar soluciones sintéticas del colorante azul de metileno para monitorear los porcentajes de remoción alcanzados.
- Identificar la cantidad de colorante que puede llegar a absorber el Jacinto de agua al final del tratamiento.
- Conocer las variaciones que presentan las variables fisicoquímicas de pH y DQO antes y después de la fitorremediación.
- Definir las concentraciones máximas de colorante que el Jacinto de agua puede tolerar, sin que eso, represente un riesgo para su supervivencia.
- Analizar la interacción entre el colorante azul de metileno y el medio acuoso producido por la *Eichhornia crassipes* para establecer que sucede entre el soluto y el solvente.

# **CAPITULO I**

## **Contaminación del Agua.**

## 1.1 Contaminación del agua

El agua es un elemento esencial en la naturaleza, porque contribuye al bienestar general del hombre, de los animales y de las plantas; es uno de los pocos elementos sin los cuales no podría mantenerse la vida en el planeta. Los seres humanos dependen de ella no solo para su sobrevivencia, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales. En las últimas décadas, el grado de contaminación de los cuerpos superficiales y subterráneos se ha incrementado por las descargas sin tratamiento previo, de aguas municipales e industriales, así como por los arrastres que provienen de zonas con actividades agrícolas y pecuarias (SEMARNAT, 2013).

La contaminación del agua se da cuando se introducen sustancias, organismos o formas de energía, modificando o alternando su composición química y/o física, haciéndola impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca, las actividades recreativas, y la vida natural” (Consejo de Europa, 1967).

Este tipo de contaminación, puede generarse de forma natural (por erupciones volcánicas, descomposición de organismos, entre otros.) o por acciones antropogénicas, como derrames de contaminantes, aumento demográfico, urbanización, etc.

Entre los contaminantes más importantes del agua generados por las actividades humanas se encuentran microbios patógenos, nutrientes, sustancias que consumen el oxígeno del agua, metales pesados y materia orgánica persistente; así como también sedimentos en suspensión y pesticidas; los cuales, en su mayoría, provienen de fuentes difusas (no localizadas). El calor, que eleva la temperatura de las aguas receptoras de vertidos también puede ser considerado un contaminante. Generalmente, estos contaminantes son la causa más importante de la pérdida de calidad del agua en todo el mundo (Ver figura 1) (UNESCO, 2009).



**Figura 1. Contaminación por metales pesados ría de Huelva, Andalucía.**  
Fuente: Ambientum, 2009

Cabe hacer notar, que la UNESCO (2010) resalto que una de las actividades económicas más contaminantes es la industria, ya que representa el 20% total de la demanda de agua. Sin embargo, lo preocupante no es la cantidad de agua utilizada, sino que más del 80% de las aguas residuales generadas en países en vías de desarrollo se descarga sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras (Scott, *et al.*, 2004).

Por lo anterior, las poblaciones de especies de flora y fauna de agua dulce se redujeron por término medio a la mitad entre 1970 y 2005, un descenso mucho más brusco que el ocurrido en otros biomas (UNESCO, 2010).

También existen aguas residuales que son evacuadas sin ningún control en las inmediaciones de áreas habitadas o que se reutilizan en el riego agrícola, generando un riesgo sanitario para la población (FUSDA, 2006).

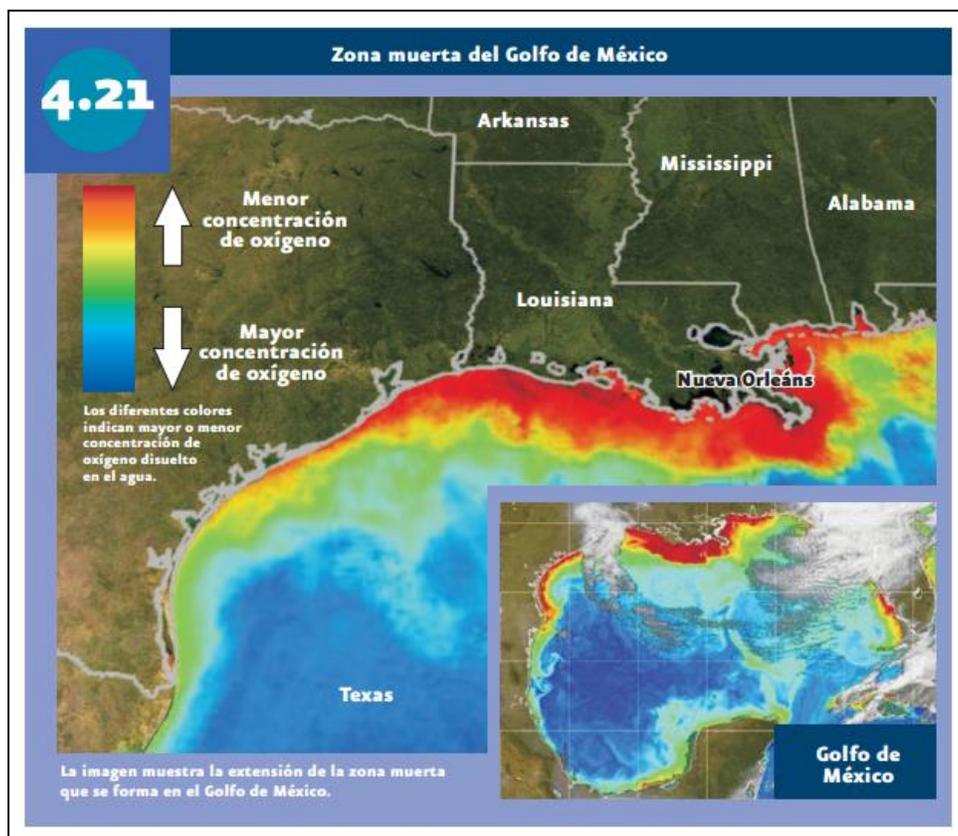
Se ha estimado que la mitad de la población del mundo en vías de desarrollo está expuesta a fuentes de agua contaminada, lo que aumenta la incidencia de enfermedades. La situación es especialmente mala en los países en desarrollo, donde las instituciones y las estructuras para el tratamiento de los residuos municipales, industriales y agrícolas son deficientes (UNESCO, 2010).

### **1.1.1 Contaminación hídrica en México**

El fenómeno de la contaminación del agua no es nuevo, ha acompañado al hombre en toda su historia. Sin embargo, el deterioro más severo y extendido de los ríos y lagos de México comenzó en 1880 en el Porfiriato, con el inicio de la industrialización y la implantación de una variedad de procesos de transformación que empleaban grandes volúmenes de agua y, en consecuencia, también generaban enormes cantidades de aguas residuales. En ese entonces, la prioridad era incrementar la producción, por lo que no se mostró ningún interés en lo que esos procesos ocasionaban al ambiente. Desde entonces se veía a los ríos y lagos como enormes depósitos donde se podían arrojar sin problema los desechos, ya que se diluían y descomponían de manera natural (SEMARNAT, 2008).

Tales procesos naturales, comenzaron a formar la idea de que los cuerpos de agua serían el reservorio “seguro” para arrojar los desechos, pues con el tiempo los contaminantes se diluirían a niveles inofensivos. Tal idea no estaba del todo infundada, pues efectivamente los cuerpos de agua tienen una gran capacidad para degradar y mineralizar gran cantidad de los contaminantes que se vierten en ellos. Sin embargo, los microorganismos que realizan la degradación, no siempre tienen la capacidad para degradar todo tipo de contaminantes o requieren de un largo periodo de tiempo para procesarlos. Por lo tanto, cuando los contaminantes rebasan los tiempos de degradación, se da el fenómeno de acumulación de contaminantes, lo que genera niveles tóxicos para los mismos organismos degradadores (SEMARNAT, 2008).

A tal grado ha llegado la contaminación en algunos mares del mundo, que desde hace algunos años han aparecido las llamadas zonas muertas; estas zonas, son porciones de mares prácticamente sin oxígeno, vida animal y/o vegetal; producto de un desmedido crecimiento de algas marinas que consumen el oxígeno del agua. Las zonas muertas para el caso de México se encuentran en el Golfo de México (Figura 2) (SEMARNAT, 2008).



**Figura 2. Delimitación de zonas muertas en el Golfo de México**  
 Fuente: SEMARNAT, 2008

De acuerdo al INEGI, la contaminación de los acuíferos en México comenzó a agravarse desde 1975, en ese año eran 32 los acuíferos contaminados, 10 años después aumentaron a 80 y para el 2010 la cifra se incrementó a 105 (INEGI, 2010).

En 2015 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015) publicó “Estadísticas del agua en México”, en dicha publicación se dio a conocer que del 100% de los cuerpos de agua que tiene México, el 7.8% tiene problemas de contaminación respecto a la DBO, el 45.2% en relación a la DQO y el 6.8% referente a los sólidos suspendidos totales (SST) (CONAGUA, 2015).

Entre los sitios altamente contaminados se localizan las cuencas hidrológico-administrativas Balsas, Lerma-Santiago-Pacífico, Pacífico-Sur y Península de Baja California. El Río Lerma es un claro ejemplo de la contaminación causada por descargas de aguas residuales habitacionales e industriales, desde la cabecera del río y a lo largo de la cuenca Lerma-Chapala-Pacífico (Sánchez, 2016).

Desafortunadamente, a pesar del panorama en México, únicamente el 47.5% de las aguas residuales colectadas recibe tratamiento, y solo un porcentaje mucho más bajo (difícil de precisar por la falta de monitoreo) cumple con las normas de calidad de descargas (Consejo Consultivo del Agua, A.C., 2017).

Debido a la pérdida de cuerpos de agua originada por la contaminación, en los últimos años se han presentado innumerables movimientos sociales, cuyo objetivo es disminuir la pérdida de biodiversidad o la remediación de cuerpos de agua; ya que hasta el 2010 las enfermedades infecciosas intestinales fueron la tercera causa de muerte en niños menores de un año (INEGI, 2011) algunos ejemplos de estos levantamientos son: San Salvador Atenco, Estado de México 2006; Santa Ana Xalmimitulco, Puebla 2007; Xoxocotla, Morelos 2008; Mazatlán, Sinaloa 2012; San José del Progreso, Oaxaca 2012; San Francisco Xochicuautla, Estado de México 2012 (Contralinea, 2013).

En México la principal fuente de contaminación hídrica son las descargas urbanas e industriales. Para el año 2011, en México el volumen de aguas residuales provenientes de los centros urbanos fue de aproximadamente 7.5 kilómetros cúbicos (equivalente a cerca de 236.3 m<sup>3</sup>/s) (SEMARNAT, 2012).

Las entidades del país que en 2011 generaron las mayores descargas de aguas residuales municipales fueron México (26.17 m<sup>3</sup>/s), Distrito Federal (22.46 m<sup>3</sup>/s) y Veracruz (16.41 m<sup>3</sup>/s; CONAGUA, 2013) (SEMARNAT, 2012).

En términos de aguas residuales industriales, en México la mayor cantidad volumen es proveniente de la acuacultura, la industria química, del azúcar, del petróleo y otros servicios, pero cuando se ve la cantidad de carga orgánica que aportan los giros industriales, la acuacultura prácticamente no aporta contaminación y entonces la industria del azúcar, petróleo y demás son las mayores aportadoras. Es decir, que no hay una correlación entre cantidad y calidad. Las industrias producen una degradación intensa en la calidad del agua, diversos impactos ecológicos y abatimiento en la disponibilidad por afectación de la calidad (Rojas, 2011).

La industria textil, por ejemplo, es una de las más importantes de nuestro país; sin embargo, es una de las industrias con mayor consumo y contaminación del agua, entre los principales contaminantes que emite se encuentran los colorantes artificiales; los cuales se diseñan para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana, por lo que son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencionales (Anjaneyulu *et al.*, 2005 y Días, *et al.*, 2007).

No solo la industria textil es la que utiliza pigmentos y colorantes sintéticos, la papelera, cosmética y farmacéutica también los utilizan, por ello, existen más de diez mil tipos diferentes de colorantes (ver tabla 1) (Anjaneyulu *et al.*, 2005 y Días, *et al.*, 2007).

**Tabla 1. Concentraciones de color y cantidad de agua generada por algunas industrias.**

INDUSTRIA	CANTIDAD DE AGUA GENERADA (m <sup>3</sup> /Ton)	COCENTRACION DE COLOR (UNIDADES HAZEN*)
Azucarera	0.4 m <sup>3</sup> /Ton caña triturada	150-200
Cervecera	0.25 m <sup>3</sup> /Ton cerveza producida	200-300
Destilera	12 m <sup>3</sup> /Ton de alcohol producido	200-300
Curtido	28 m <sup>3</sup> /Ton de papel	400-500
Papelera	175 m <sup>3</sup> /Ton de papel	100-600
Textilera	120 m <sup>3</sup> /Ton de fibra	1100-1300

\* Unidades Hazen o Platino-Cobalto son estándares basados en la escala de color introducida en 1892 por el químico Allen Hazen.

Fuente: Cortazar, 2009

### 1.1.2 Clasificación de los contaminantes del agua

De acuerdo a Jiménez (2001) y Sette, *et al.*, (1990) los contaminantes presentes en el agua pueden clasificarse en químicos, biológicos y físicos.

**a) Contaminantes químicos;** provienen de los drenados de minas, desechos solubilizados de la agricultura, derrames de petróleo, pesticidas, aguas residuales municipales y desechos líquidos industriales; dichos contaminantes pueden dividirse en orgánicos e inorgánicos (Jiménez, 2001).

Entre los principales **compuestos orgánicos** se encuentran los hidratos de carbono, aminoácidos, proteínas, aceites, grasas, hidrocarburos y

carbohidratos, estos son sustancias susceptibles de ser biodegradadas por poblaciones heterogéneas de microorganismos, mediante una fermentación aerobia o anaerobia (Ramos, 2003).

- b) Compuestos inorgánicos:** Generalmente se presentan en forma de disoluciones, soluciones y coloides; la mayor parte de estas sustancias son sales inorgánicas (cloruros, sulfatos, silicatos y óxidos metálicos) y elementos tóxicos como los metales, no metales, elementos radiactivos y especies minerales no disueltas, los cuales son relativamente estables y no están sujetos a los procesos de biodegradación (Ramos, 2003).
  
- c) Contaminantes físicos:** Son los contaminantes responsables de alterar las propiedades físicas del agua (Jiménez, 2001); algunos contaminantes físicos incluyen: cambios térmicos (por ejemplo, las aguas procedentes de plantas industriales, relativamente calientes después de haber sido utilizadas en los intercambiadores); color (por ejemplo, los licores negros que se descargan procedentes de las plantas de fabricación de pasta química); turbidez (originada por la descarga de aguas que contienen sólidos en suspensión); espumas y radiactividad (Sette, *et al.*, 1990).
  
- d) Contaminantes biológicos:** Los contaminantes biológicos son los responsables de la transmisión de enfermedades en las aguas de abastecimiento (Sette, *et al.*, 1990). Algunas de las enfermedades que se transmiten por contaminación biológica son el cólera, las tifoideas y paratifoideas. De acuerdo a Jiménez (2001), se estima que el 80% de todas las enfermedades y más de 1/3 de los fallecimientos en países en vías de desarrollo, se debe al consumo de agua contaminada.

## 1.2 Colorantes artificiales

### 1.2.1 Definición y caracterización

Los colorantes son sustancias orgánicas fluorescentes que imparten color a una sustancia o sustrato incoloro, por medio de una absorción selectiva de luz (Moeller y Garzón, 2003).

De acuerdo al IMTA (2013), las moléculas de los colorantes artificiales están constituidas por tres grupos funcionales: cromóforo, auxocromo y solubilizador. (Ver figura 3).

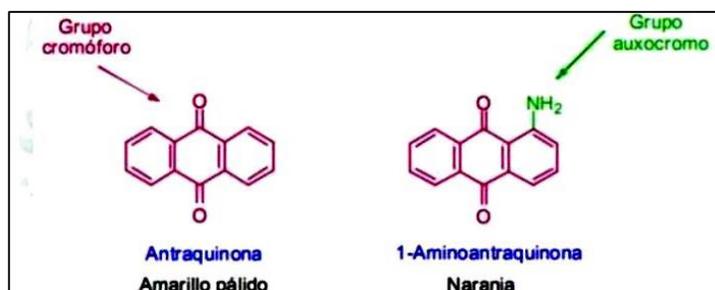
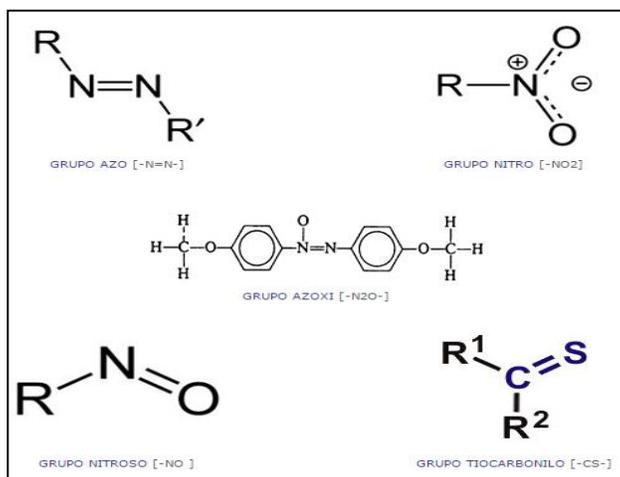


Figura 3. Estructuras químicas de colorantes artificiales con representación de los grupos cromóforo y auxocromóforo

Fuente: IMTA, 2013

El grupo cromóforo es el responsable de otorgar color a las moléculas (Marcano, 1990; en Garzón, 2009); algunos de los grupos más importantes son: Azo, Nitro, Azoxi, Nitroso y Tiocarbonilo (Ver figura 4). El grupo auxocromo está formado por átomos con carga positiva, que tienen la propiedad de intensificar la acción del grupo cromóforo dentro de la misma molécula de una sustancia; entre los más importantes destacan: las aminas, carboxilos, sulfonatos e hidroxilo (Red Textil Argentina, 2012). Finalmente, el solubilizador es el que se encarga de dar afinidad a solventes diversos y está dado por la presencia de iones como  $-\text{SO}_3^- \text{Na}^+$ ,  $-\text{NH}_3^+ \text{Cl}^-$ ,  $-\text{SO}_2\text{NH}_2^+$ ,  $-\text{O}^+ \text{Na}^+$  (Marcano, 1990; en Garzón, 2009).



**Figura 4. Estructura química de los grupos cromóforos**

Imagen de: Red Textil Argentina, 2012

Debido a la estabilidad que tiene la estructura química de los colorantes artificiales, estos se han convertido en un problema ambiental que afecta principalmente a los cuerpos de agua, ya que son resistentes a la biodegradación y a los tratamientos para su disposición final, lo que aumenta las posibilidades de sufrir transformaciones a compuestos más peligrosos, por ejemplo, en aminas aromáticas, las cuales son potencialmente cancerígenas (Piña, 2007).

Sin embargo, a pesar de los daños ambientales o de salud que pueden provocar, los colorantes, todavía siguen utilizándose en varios sectores industriales; entre ellos el sector textil. En dicho sector se estima que los colorantes conforman entre el 10% y el 15% la composición total de las aguas residuales industriales (Garzón, 2003).

El color del agua se puede determinar a través de las unidades Hazen o Platino-Cobalto; estos nombres son comúnmente utilizados en diferentes aplicaciones, pero están basados en procedimientos similares. Estas unidades son estándares basadas en la escala Hazen, introducida en 1892 por el químico Allen Hazen (Químico Técnica Industria, 2016).

En México, la técnica Platino-Cobalto se encuentra regulada por la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), a través de la NMX-AA-045-SCFI-2001

“Análisis de agua - determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-045-1981)”, en la que se explica que el objetivo del método es para determinar el color aparente y/o verdadero en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. (SCFI, 2001).

El principio de este método se basa en la medición del color verdadero y/o aparente en una muestra de agua natural, mediante su comparación visual con una escala estandarizada de platino-cobalto. (La unidad platino-cobalto es la que se produce al disolver un mg de platino/L en forma de ion cloroplatinato). Cabe señalar que este método depende de la apreciación visual del color de la muestra por el analista en comparación con una escala estandarizada (SCFI, 2001).

### **1.2.2 Producción y comercialización**

Después de la Segunda Guerra Mundial, la industria petroquímica experimentó un gran avance que repercutió en la producción de fibras y colorantes sintéticos utilizados en la industria del vestir; dicho acontecimiento provocó el desplazamiento de las fibras y colorantes naturales debido a los bajos costos de producción (Wang, 1997).

A principios del siglo XX, el 85% de la producción mundial de colorantes fue fabricada en Alemania (Piña, 2007), y países europeos como Suiza, Reino Unido y Francia, aportaron más del 10% de la producción (Cruz, *et al.*, 2001).

Actualmente la mayor parte de los colorantes empleados en todos los procesos industriales son sintéticos y su producción mundial anual se estima en al menos 10 millones de toneladas de colorante (UV, 2008).

A pesar de que la producción mundial actual de colorantes no ha sido publicada, los siguientes datos pueden ser ilustrativos para dimensionar la cantidad de colorantes que actualmente se producen. Por ejemplo, para el caso de México en 1998 las empresas que se dedicaban a la fabricación de colorantes eran Basf Mexicana, Bayer de México, Pyosa, entre otras (Ver tabla 2).

**Tabla 2. Empresas fabricantes de colorantes en México**

Empresa	Tipo de colorante
Basf Mexicana, S.A. de C.V.	Disperso
Bayer de México, S.A. de C.V.	Ácido, básico, directo, disperso y otros colorantes
Ciba Especialidades, S.A. de C.V.	Ácido, básico, directo, y disperso
Clariant de México, S.A. de C.V.	Otros colorantes
Pyosa, S.A. de C.V.	Directo, disperso y para alimentos
Warner Jenkenson, S.A. de C.V.	Para alimentos

Fuente: Piña, 2007

Para ese mismo año, los colorantes que mayor producción tuvieron fueron los básicos con 2,448 toneladas, sin embargo, los que más se consumieron fueron los colorantes dispersos con 3,501 toneladas (Ver tabla 3).

**Tablas 3. Consumo de clases de colorantes producidos en México en 1997**

Toneladas	Colorantes ácidos	Colorantes básicos	Colorantes directos	Colorantes dispersos	Colorantes para alimentos	Otros colorantes
Producción	250	2448	306	2137	1100	3205
Importación	1822	1137	1171	2363	161	6480
Exportación	155	1160	15	999	270	27
Consumo	1917	2425	1462	3501	991	9658

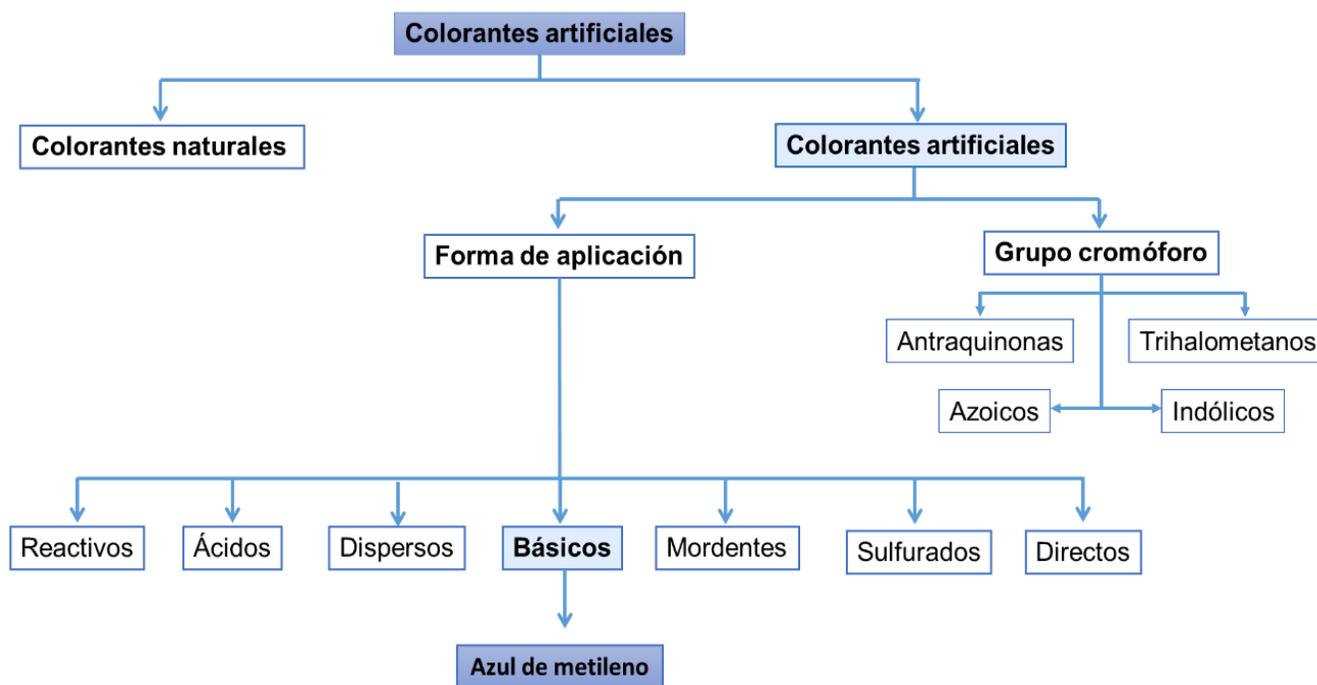
Fuente: Piña, 2007

Gracias a los datos anteriores, es posible asumir que la producción de colorantes se ha incrementado en los últimos años, debido al aumento de la población que día a día demanda vestido, alimento y materia prima para la elaboración de productos.

### 1.2.3 Clasificación de los colorantes

De acuerdo a Willmontt (1998, en Piña, 2007), cada colorante presenta características físicas, químicas y biológicas diferentes de acuerdo a su origen, las cuales influyen de manera directa sobre su uso final y efectos sobre el ambiente.

A continuación, en el siguiente esquema se explica brevemente la clasificación de los colorantes; así como también, la clasificación a la que pertenece el colorante objetivo de la presente investigación azul de metileno.



**Figura 5. Diagrama “Clasificación de colorantes”**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

Tal y como se observó en la figura 5, la clasificación de los colorantes parte de su origen; es decir, pueden ser de origen natural o de origen artificial:

## **I. Colorantes naturales**

Son sustancias coloreadas extraídas de fuentes naturales para la tintura o coloración de las fibras textiles; estas se clasifican en colorantes vegetales y colorantes animales (Red textil argentina, 2012).

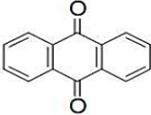
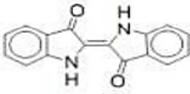
## **II. Colorantes artificiales**

Son aquellos colorantes que se realizan a partir de la síntesis de metales y derivados del petróleo (Red textil argentina, 2012), se caracterizan por ser altamente solubles en el agua y resistentes a la acción de agentes químicos y biológicos (IMTA, 2013).

Actualmente los colorantes artificiales son clasificados por el Colour-Index; este es un sistema de clasificación para colorantes y pigmentos utilizados a nivel mundial, que emplea dos métodos para su clasificación, el primero basado en la estructura química y el segundo por su método aplicación. Hasta el año 2015 dicho sistema contaba con 13,000 registros de estructuras químicas y cerca de 37,000 nombres comerciales de colorantes (Colour-Index.com; 2015).

La clasificación por estructura química o grupo cromóforo consiste en identificar los colorantes que pertenecen a un grupo con propiedades similares; a continuación, en la tabla 4 se muestra la clasificación de los colorantes de acuerdo a los principales grupos cromóforos.

**Tabla 4. Clasificación de los colorantes de acuerdo al grupo cromóforo.**

Familia	Grupo cromóforo	Descripción
<b>Azoicos</b>	$Ar-N=N-Ar$ Grupo azo	Se caracterizan por tener un enlace doble de Nitrógeno unido a átomos de Carbono. En cuanto a sus propiedades, su rango de matices es completo y de alta intensidad.
<b>Antraquinonas</b>	 Antraquinona	Los colorantes a base de antraquinonas y quinonas aromáticas policíclicas tienen solidez a la luz; los colorantes ácidos, mordentes y dispersos corresponden a esta categoría.
<b>Indólicos</b>	 Índigo	Su compuesto progenitor es el índigo, puede aplicarse a fibras celulósicas para después oxidarlo y obtener teñidos azules de gran brillantez.
<b>Trihalometanos</b>	 Cation trifenilmetilo	Caracterizados por un grupo cromóforo altamente estabilizado por resonancia, su color es intenso y brillante, pero exhiben poca solidez a la luz.

Fuente: IMTA, 2013

Sin embargo, a nivel industrial la clasificación por método de aplicación o uso final es considerada como una de las más fáciles y sencillas para diferenciar los colorantes (Pedraza, 2007). Dicha clasificación consiste en agrupar toda la gama de colores en 6 grupos: ácidos, básicos, dispersos, directos, reactivos, sulfurados, mordentes y a la tina (IMTA, 2013) (Ver tabla 5).

**Tabla 5. Clasificación de colorantes de acuerdo a su forma de aplicación**

Clase	Producto químico principal	% de fijación	Probables contaminantes
Ácidos	Tipo azo, antraquinona, trihalometano	80-93	Ácidos orgánicos, aminas aromáticas
Básicos	Tipo azo, antraquinona, oxazina, triarilmetano	97-98	Ácidos orgánicos, aminas aromáticas
Dispersos	Contienen azoicos, antraquinona, nitro y grupo benzodifuranona	80-92	Sales, surfactantes, fosfatos, lubricantes, dispersantes
Directos	Contienen poliazos, ftalocianinas y oxazinas	70-95	Aminas aromáticas, sales, surfactantes
Reactivos	Contienen grupos cromóforos, como azo, antraquinona, triarilmetano, ftalocianina	60-90	Aminas aromáticas, sales, surfactantes
Sulfurados	No poseen una estructura determinada	60-70	Aminas aromáticas, álcalis, agentes oxidantes y reductores
Mordentes	Azo y antraquinona	85-98	Aminas aromáticas, sales orgánicas, halogenados, metales pesados, color no fijado

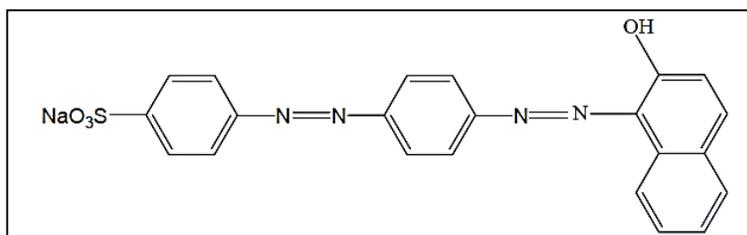
Fuente: IMTA, 2013

A continuación, se describen los colorantes de acuerdo a su clasificación por aplicación:

○ **Colorantes ácidos**

Son compuestos orgánicos aniónicos utilizados para la tinción de lana, seda y poliamida; se aplican en un medio que puede variar desde fuertemente ácido a neutro, y por lo general a temperaturas cercanas al punto de ebullición. La ionización del colorante se logra al aplicar junto con él un ácido orgánico, puede ser ácido acético o sulfúrico, a un pH entre 2-6 unidades (Piña, 2007).

Actualmente existe un gran número de colorantes ácidos divididos en subfamilias, con una amplia variedad de propiedades; por ejemplo, los colorantes azóicos ácidos son los tintes amarillos, anaranjados, rojos, etc. (mezclas de varios azóicos) (IMTA, 2013) (Ver figura 6).

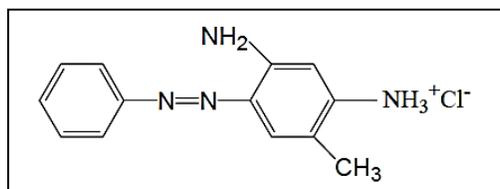


**Figura 6. Colorante rojo ácido 151**

Fuente: Bautista, 2011

### ○ **Colorantes básicos**

Se usan para dar color al papel, nylon, poliéster modificado, seda, lana y algodón tanino mordentado. Son colorantes que utilizan agentes catiónicos-aniónicos adicionales para controlar el proceso de tintura, generalmente estos agentes son sales de bases orgánicas que fuerzan al grupo cromóforo a unirse al catión, resultando el anión incoloro (IMTA, 2013) (ver figura7).

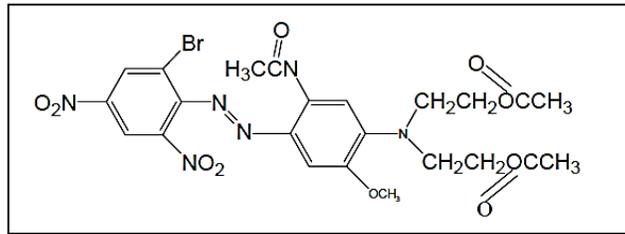


**Figura 7. Estructura del colorante Azo Naranja Básico 1**

Fuente: Bautista, 2001

### ○ **Colorantes dispersos**

Son compuestos orgánicos no iónicos; se aplican con un dispersante porque son insolubles en agua; se caracterizan por tener alto grado de dispersión (IMTA, 2013). Se utilizan en la tinción de rayón, poliéster, nylon, diacetato y triacetato de celulosa, así como fibras acrílicas (Piña, 2007).



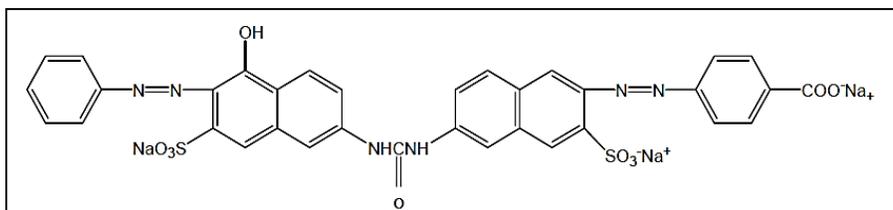
**Figura 8. Estructura del colorante azul disperso 79**

Fuente: Bautista, 2011

### ○ **Colorantes directos**

Son colorantes aniónicos que se aplican en solución acuosa en presencia de un electrolito para hacer el teñido de la fibra; su estructura es compleja ya que contiene usualmente más de dos ligaduras azo. La ventaja principal de éstos es que son muy estables a la luz y se absorben fácilmente en las impurezas del agua (Piña, 2007).

Existen dos tipos de colorantes directos, los ácidos y básicos, siendo los ácidos sales de los ácidos sulfúricos o carboxílicos que se precipitan sobre la fibra. Los colorantes básicos son sales amoniacales o complejos formados por cloruro de zinc o aminas (ver figura 9). Estos dos tipos de colorantes se emplean especialmente en el teñido de lanas y en poliamidas sintéticas. Algunos colorantes básicos, de elevado peso molecular, se absorben por el algodón y el rayón (Walter, 1987).



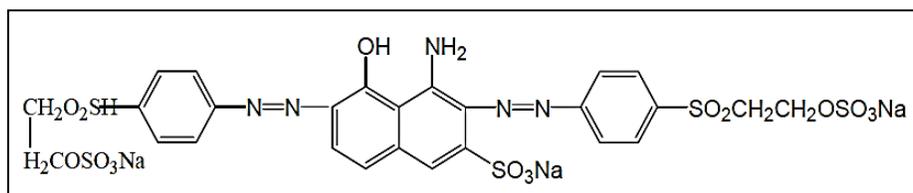
**Figura 9. Estructura del colorante azul directo 2 (Color Index, 2015)**

Fuente: Bautista, 2011

### ○ **Colorantes reactivos**

Son colorantes aniónicos que se utilizan para teñir fibras naturales (algodón o lana) y sintéticas (poliamida (nylon), dichos colorantes están formados por diferentes grupos sulfónicos cuya finalidad es otorgar la propiedad de solubilidad en el agua; están compuestos por tres grupos básicos: un grupo cromóforo, un grupo de unión

y uno y varios grupos reactivos; por ejemplo, la tricloropirimidina (ver figura 10) (Piña, 2007).

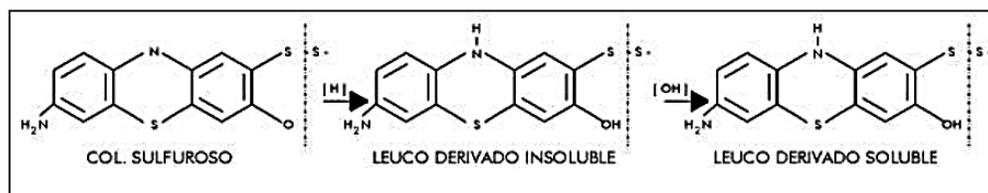


**Figura 10. Estructura del colorante negro reactivo 5**

Fuente: Bautista, 2011

○ **Colorantes sulfurosos**

Se llaman sulfurosos porque en su molécula está presente el azufre, con la posibilidad de ser oxidado con facilidad. Se caracterizan por teñir fibras directamente en estado reducido y se combinan con los colorantes básicos para dar una laca insoluble; la cantidad de colorante absorbido depende de su porcentaje en la solución, de la concentración de sal en el baño y de la temperatura (IMTA, 2013).

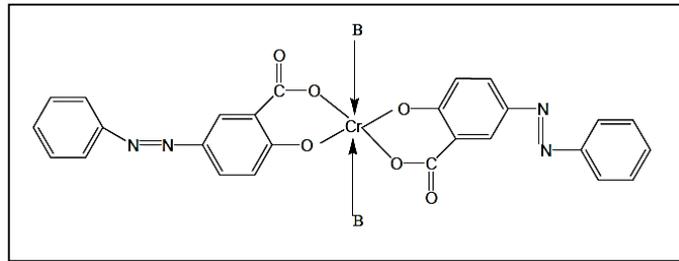


**Figura 11. Colorantes sulfurosos**

Fuente: IMTA, 2013

○ **Colorante mordentes**

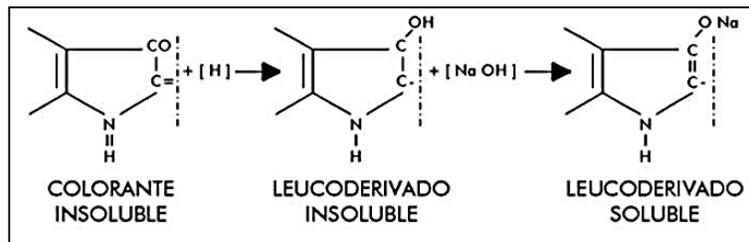
Su característica principal es que no se fijan por si mismos a la fibra, sino que necesitan de un metal (generalmente cromo), para formar lacas (ver figura 12); a este proceso se le llama “mordentado” el cual consiste en tratar en un medio ácido (pH 2-6) el colorante junto con sales metálicas, como el cromato de sodio para formar el complejo metálico en el sitio de teñido; se usan para teñir lana y seda (Piña, 2007).



**Figura 12. Estructura del colorante Azo Amarillo Mordante 1 metalizado, B, es cualquier grupo  $-NH_2-NH$**   
Fuente: Bautista, 2011

### ○ **Colorantes a la tina**

Son colorantes que tienen entre sí diferente constitución química, pero todos son insolubles en agua. Por su reducción en un medio alcalino se transforman en leucoderivados hidrosolubles (Figura 13). El proceso de reducción se fundamenta en la acción reductora del hidrógeno sobre el grupo carbonilo, transfiriéndolo al grupo alcohólico (IMTA, 2013).



**Figura 13. Colorantes a la tina**  
Fuente: IMTA, 2013

Una vez realizado el teñido, es fácilmente oxidable por el oxígeno del aire. Estos colorantes dan teñidos más brillantes que los antraquinónicos, pero menos sólidos ante la luz y el lavado (IMTA, 2013).

#### **1.2.3.1 Colorantes básicos**

Los colorantes básicos son sales formadas por la combinación de ácidos (clorhídrico, sulfúrico, nítrico, oxálico o acético) y bases colorantes (De la Torre, 1975), son denominados colorantes nucleares, porque tienen afinidad con los ácidos nucleicos (ADN y ARN) (Montalvo, 2010).

Generalmente los colorantes básicos tienen gran capacidad de tinte ya que sólo 1 mg/l de colorante produce una fuerte coloración al agua, además de que tiene la capacidad de ser adsorbido en muchos minerales y en la materia orgánica del agua. Sin embargo, cuando las tinturas básicas se aplican en celulosa el color es pobre a la luz y al fregado (Kirk-Othmer, 1993).

Los colorantes básicos se utilizan a menudo para teñir fibras de poliéster y nylon modificado, debido a que producen alta intensidad de color y mayor brillantez en la fibra que otros colorantes (Kirk-Othmer, 1993). Asimismo, se usan para realizar tinciones en las preparaciones microbiológicas, ya sean preparaciones en fresco (microorganismos vivos) o preparaciones fijas y teñidas (microorganismos muertos) (UNAM, 2015).

### 1.2.3.2 Azul de metileno

El Azul de Metileno es un colorante básico cuyo nombre científico es Cloruro de metilionina, su fórmula química es  $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$ ; es un colorante heterocíclico aromático, su estructura química se muestra en la Figura 14 y su estructura tridimensional en la Figura 15 (CCM, 2015; Anaya, 2012).

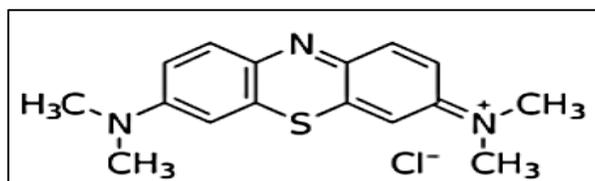


Figura 14. Estructura del Azul de Metileno  
Fuente: Anaya, 2012

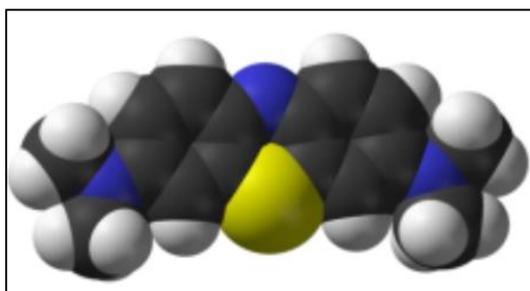


Figura 15. Estructura tridimensional del Azul de Metileno  
Fuente: Anaya, 2012

Entre las características principales del azul de metileno se mencionan las siguientes: es un compuesto de color azul oscuro, es soluble en agua; posee propiedades redox derivadas de su capacidad para aceptar o donar iones de hidrogeno; su masa molecular es de 319,85 g/mol; su punto de fusión es a los 100°C; tiene carga positiva, por lo tanto le es fácil unirse a componentes celulares cargados negativamente llamados componentes basófilos (nombre derivado por su afinidad a los colorantes básicos) (CCM, 2015).

Debido a que este colorante es de origen sintético y con estructuras moleculares aromáticas complejas, es inerte y difícil de degradar, razón por la cual es vertido de las plantas de tratamiento convencionales sin ser tratado. En el ambiente natural su degradación es lenta por lo que suele acumularse e incrementar su concentración en los distintos nichos ecológicos (Bautista, 2011).

Este colorante básico en especial, tiene varias áreas de aplicación ya sea para usos de laboratorio, análisis, investigaciones, química fina, medicina e incluso en acuicultura.

El azul de metileno fue uno de los primeros colorantes usados en medicina (Calvo, 2015). Actualmente se utiliza para probar la permeabilidad de los tejidos biológicos o de un órgano (CCM, 2015), es usado para el diagnóstico de la difteria, además se usa como pintura para teñir ciertas partes del cuerpo, antes o durante la cirugía; sin embargo, su uso principal es como antiséptico y cicatrizante interno (Mauri, 2013).

Una de las razones por las que se usa en medicina podría ser por su capacidad de actuar como un antioxidante, protegiendo a las células del daño oxidativo, incluso existe la evidencia de que puede ayudar a las células a despejar las proteínas viejas que ya no necesita y puede hacer que las proteínas se unan entre sí (Mauri, 2013).

En laboratorios el azul de metileno es un colorante ampliamente utilizado en la tinción de estructuras celulares, tejidos de soporte y otras estructuras orgánicas de los bacilos. En la biología, se emplea para diferentes procesos de tinción como medio de contraste y como un indicador de vida en las células. (UNAM, 2015). En

histología se le emplea como colorante nuclear en combinación con la oesina, para la coloración del tejido sanguíneo (De la Torre, *et al.*, 1975).

En acuicultura el azul de metileno se utiliza para tratar enfermedades en los peces ornamentales, por ejemplo, la Lonfoquistosis, o para evitar mucosas en los estanques (Cedillo, *et al.*, 2001); el colorante también es capaz de proveer protección contra la intoxicación por nitrilos y ocasionalmente es usado como antiséptico tipo antifúngico en infecciones por protozoos en cultivo de peces (Lannacone, 2007).

Finalmente, para la industria, en el ramo textil el azul de metileno es uno de los colorantes más comunes para dar color al algodón, lana y seda; y en la alimenticia es uno de los colorantes con mejor adsorción en alimentos sólidos (Khan, *et al.*, 2005).

### **1.3 Contaminación por colorantes**

Los colorantes son compuestos químicos xenobióticos, que no se encuentran de manera natural en la biosfera, sino que han sido sintetizados por el hombre (Moeller & Garzón, 2003, en Garzón 2009). Debido a la complejidad estructural que presentan, actualmente las plantas de tratamiento convencionales tienen un porcentaje muy bajo de remoción, razón por la cual casi siempre son vertidos sin ser tratados (Alatorre & Moeller, 2006, en Garzón, 2009).

El color pocas veces es considerado un contaminante, pese a que puede estar asociado a la presencia de compuestos tóxicos y grupos cromóforos o polímeros de alto peso molecular como la lignina. Estos efluentes coloreados poseen una alta capacidad de bioacumulación y una baja velocidad de despolimerización (Rodríguez, *et al.*, 2006, en Garzón 2009), lo que permite su acumulación a largo plazo en lagos y bahías, afectando procesos químicos y biológicos indispensables para el crecimiento de los ecosistemas, como la fotosíntesis (Garzón, 2009).

Es importante mencionar que una vez estabilizados los colorantes en el ambiente, automáticamente adquieren la capacidad de permanecer en él durante mucho

tiempo; por ejemplo, la vida media del reactivo hidrolizado blue 19 (utilizado en textiles para dar color a la mezclilla) es cercana a los 46 años (UV, 2008).

La mayoría de las aguas residuales que contienen colorantes provienen de la industria papelera, textil, destiladora y alimenticia (Cortazar, 2009). Específicamente la industria textil consume una enorme cantidad de agua potable; si se toma en cuenta el volumen de descarga y la composición de los efluentes, se llega a la conclusión que es uno de los giros más contaminantes de todo el sector industrial, además consume dos terceras partes de la producción total de los colorantes (UV, 2008); los cuales al entrar en contacto con el ecosistema acuático comienzan a sufrir una serie de reacciones que alteran su estructura química, lo que da como resultado la formación de compuestos cancerígenos (Piña, 2007).

Algunas de las variaciones que se presentan en el agua por estar en contacto con colorantes son el aumento de sólidos suspendidos, carga iónica, color, compuestos orgánicos expresados en DQO, DBO y AOX (Haluros Orgánicos Absorbibles); así como también el incremento de metales pesados como el cobre, zinc, cromo y níquel que son tóxicos al ambiente (AFIRM, 2013).

En la fauna acuática los colorantes son los responsables de disminuir el número de glóbulos rojos, el peso corporal y reducir hasta un 44% el tamaño de los órganos reproductores (Cortazar, 2009). De acuerdo a algunos estudios en laboratorio, el contacto de efluentes textiles con el organismo de los animales (en este caso ratas albinas) provoca una disminución en la función testicular, además de alteraciones sobre la síntesis de proteínas en las células espermatozógenas; también se encontró la disminución de proteínas en el hígado como resultado de la acción necrótica del efluente con colorantes (Mathur *et al.*, 2003).

En algunos casos las concentraciones de metales en efluentes contaminados por colorantes pueden producir acumulaciones tóxicas en los tejidos de los organismos acuáticos. Así mismo, estos efluentes también pueden aumentar la población de

peces y algas debido a su alto contenido de nitrógeno y contribuir al agotamiento del oxígeno disuelto en el agua (Mancilla, *et al.*, 2007).

En cuanto a afectaciones a la salud humana por colorantes, se sabe que al ser ingeridos se degradan en el tracto intestinal y producen aminas alifáticas y aromáticas las cuales son altamente cancerígenas y mutagénicas (Wingrove y Caret, 1999). Algunas de las aminas que pueden ser liberadas por colorantes son: 4-Aminodifenil, 2-Amino-1-nitrotolueno, Benzidina, 4-Cloro-o-toluidina, entre otras (TheGazette of India, 1996).

Debido a que en esta investigación el colorante a estudiar es el azul de metileno, es importante conocer las consecuencias que provoca al estar en contacto con el agua o dentro de cualquier ser vivo. Por ejemplo, se sabe que la exposición aguda al azul de metileno puede causar quemaduras en los ojos y lesiones permanentes en humanos y animales. Su inhalación puede ocasionar dificultad respiratoria, mientras que la inhalación a través de la boca produce sensación de quemadura, incluso puede provocar náuseas, vómito, confusión mental, aumento en el ritmo cardíaco, shock, la formación de cuerpos Heinz, cianosis, ictericia, cuadriplejía y necrosis de los tejidos en los seres humanos (Rafatullah *et al.*, 2010).

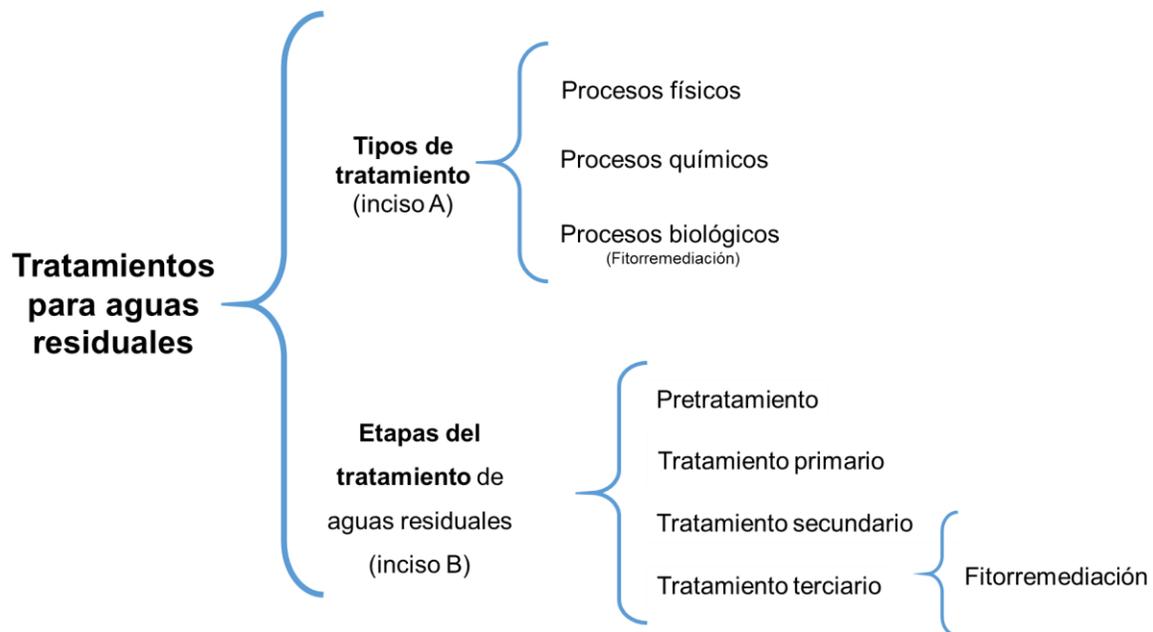
Por todas las consecuencias ambientales y de salud ya mencionadas que pueden producir los colorantes es de vital importancia eliminarlos desde que se generan como residuos en las plantas industriales.

## **1.4 Tratamientos de aguas residuales**

### **1.4.1 Definición y clasificación de tratamientos de aguas residuales**

El tratamiento de aguas residuales, también conocido como proceso de depuración; es un sistema utilizado para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, a través de distintos procesos realizados en una planta de tratamiento (Interapas, 2015). Su objetivo es acelerar el proceso de degradación para obtener agua tratada o reutilizable que cumpla con las características solicitadas por las Normas Oficiales Mexicanas (Pérez, 2011).

Los procesos para el tratamiento de aguas residuales pueden ser físicos, químicos, biológicos o combinados (UNAD, 2015); los cuales pueden aplicarse en cualquiera de las cuatro etapas que conforman el tratamiento de aguas; ya sea en el pretratamiento, tratamiento primario, secundario o terciario. En la figura 16, se muestran los tipos de tratamiento y las etapas que conforman el tratamiento de aguas residuales, además se muestran los tratamientos donde es factible emplear la fitorremediación para mejorar los resultados.



**Figura16. Tratamientos y etapas del tratamiento para aguas residuales**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

## **A) Tipos de tratamiento para aguas residuales**

- **Procesos físicos:** son métodos de tratamiento en los cuales predomina la aplicación de fuerzas físicas, son conocidos como unidades de operación física. Estos métodos fueron los primeros en ser usados para el tratamiento de aguas residuales; son típicamente tamizado, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, filtración y transferencia de gases (UNAD, 2015).
- **Procesos químicos:** son métodos de tratamiento en los cuales la remoción o conversión de contaminantes se lleva a cabo mediante la adición de químicos o mediante otras operaciones químicas, son conocidos como unidades de proceso químicos. Los ejemplos más comunes son precipitación, absorción y desinfección (UNAD, 2015).
- **Procesos biológicos:** son métodos de tratamiento en los cuales la remoción de contaminantes se lleva a cabo mediante actividad biológica, son conocidos como unidades de procesos biológicos. El tratamiento biológico se usa principalmente para remover las sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas) en el agua residual (básicamente las sustancias son convertidas en gases que pueden escapar a la atmósfera y en tejido celular biológico que puede ser removido mediante sedimentación) (UNAD, 2015).

## **B) Etapas del proceso para el tratamiento de aguas residuales**

Las etapas que conforman este proceso son las siguientes:

- **Pretratamiento:**  
Comienza desde que las aguas residuales son conducidas por la red de alcantarillado hasta la estación depuradora; dicha etapa se caracteriza por eliminar residuos sólidos muy grandes, desarenar y desengrasar el agua. El objetivo del pretratamiento es preparar las aguas residuales para las siguientes etapas y eliminar cualquier objeto que pueda disminuir la eficiencia de los tratamientos o

causar daños a los equipos y maquinaria (Agua.org, 2015). Algunos de los tratamientos que se utilizan para esta primera etapa se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6. Ejemplos de procesos realizados en el pre-tratamiento**

Nombre del proceso	Descripción
<b>Desbaste</b>	Se realiza por medio de rejillas con barras de 6 mm de grosor acomodadas a 100 mm de distancia, se encargan de retener materiales sólidos gruesos. (Agua.org, 2015; EIA, 2015).
<b>Tamiz</b>	Se utilizan tamices con aberturas máximas de 2.5 mm para remover sólidos que puedan atascar tuberías o filtros biológicos; tienen una inclinación que permite correr el agua y deslizar los desechos fuera de la malla (EIA, 2015).
<b>Microfiltros</b>	Son planillas giratorias plásticas o de acero, por las cuales circula el agua y recogen los desechos en su interior, los microfiltros tiene sistemas de lavado para que así puedan mantener las mallas limpias (EIA, 2015).
<b>Desarenadores</b>	Son unidades encargadas de retener arenas, guijarros, tierra y otros elementos vegetales o minerales (EIA, 2015).

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a EIA, 2015.

○ **Tratamiento primario:**

Conjunto de tratamientos físicos o físico-químicos cuyo propósito principal es remover materiales propensos a flotar o sedimentar, además de neutralizar el nivel de pH y eliminar contaminantes volátiles como el amoniaco. Generalmente en esta etapa se remueven aproximadamente el 60% de los sólidos suspendidos, el 35% de la DBO<sub>5</sub> (UNAD, 2015, EIA, 2015). A continuación, en la tabla 7 se muestran algunos de los tratamientos utilizados en esta etapa:

**Tabla 7. Ejemplos de procesos realizados en el tratamiento primario**

Nombre del proceso	Descripción
<b>Precipitación química o coagulación</b>	Proceso en el que se agregan sustancias químicas que hacen más rápida y eficaz la sedimentación de desechos (EIA, 2015).
<b>Desaceitado y desengrase</b>	Consiste en separar el agua de los aceites a través de la ruptura de moléculas en placas coalescentes, donde el aceite es llevado a la superficie por simple gravedad, para ser removido (Cámara, 2001).
<b>Flotación</b>	Sistema de separación sólido-líquido o líquido-líquido basado en la diferencia de densidades, se utiliza para separar grasas, aceites, materia floculada en clarificación, espesamiento de fangos activos, hidróxidos metálicos y pigmentos (UNAD, 2015).
<b>Neutralización</b>	Basado en la adición de un ácido o un agente alcalinizante al agua residual, con el propósito de ajustar su pH antes de su descarga al medio receptor (entre 5 y 9 unidades), para mejorar su actividad biológica (entre 6.5 y 8.5 unidades), o para propiciar la precipitación de metales pesados (entre 6 y 11 unidades) (UNAD, 2015).
<b>Sedimentación</b>	Proceso mediante el cual se dejan asentar por gravedad los sólidos en suspensión en las aguas residuales. (EIA, 2015).
<b>Decantación</b>	Consiste en separar componentes con diferentes densidades, se efectúa vertiendo la fase superior (menos densa) o la inferior (más densa) (Castillo 2011).
<b>Coagulación</b>	Proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. La finalidad de proceso es eliminar la turbiedad, materia orgánica y microorganismos (Andía, 2000).
<b>Floculación</b>	Proceso siguiente a la coagulación; consiste en la agitación de la masa coagulada para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad (Andía, 2000).
<b>Desarenado</b>	El desarenado tiene como objetivo eliminar partículas más pesadas que el agua, que no se hayan quedado retenidas en el desbaste, y que tienen un tamaño superior a 200 micras (Ramalho, <i>et al.</i> , 1996).

Fuente: Elaboración propia con base a EIA, 2015; Hernández 2001; UNAD, 2015; Castillo, 2011; Andía, 2000; Ramalho, *et al.*, 1996.

○ **Tratamiento secundario:**

Etapa que se caracteriza por la remoción de  $DBO_5$  soluble y algunos sólidos suspendidos por medio de procesos biológicos y químicos (EIA, 2015), en los cuales se somete a los compuestos orgánicos complejos a la acción de microorganismos para convertirlos en compuestos más simples; mientras la demanda de oxígeno va disminuyendo al mismo tiempo va aumentando su concentración (Agua.org, 2015). Se dice que este tratamiento provee las mismas reacciones biológicas que pudieran ocurrir en un cuerpo de agua receptor si éste tuviera una capacidad adecuada de asimilar el agua residual (UNAD, 2015).

Es importante mencionar que el desarrollo de esta etapa está influenciado por dos factores principales:

- La magnitud de la superficie de contacto entre el agua residual y los microorganismos debe ser lo más extensa posible.
- La aportación de oxígeno.

Los tratamientos que se utilizan en esta etapa pueden ser de dos tipos, de acuerdo al tipo de superficie de contacto, ver tabla 8.

**Tabla 8. Ejemplos de procesos realizados en el tratamiento secundario**

Nombre del proceso	Descripción
<p><b>Cultivo o película fija: la superficie de contacto es un sólido (espacio físico). Puede ser cualquier tipo de sólido (plástico, madera piedra).</b></p>	<p>Filtros de percolado, filtros de goteo: Es una superficie redonda con una especie de brazos que tienen la función de expandir el líquido y distribuirlo en la superficie</p> <p>Biodiscos: basado en una serie de discos que están fijos o unidos a un eje central, que pueden girar y están en una especie de tanque.</p>
<p><b>Cultivos suspendidos: la superficie de contacto es un medio líquido (en una solución se dejan caer los microorganismos).</b></p>	<p>Lodos o fangos activados: compuestos por organismos vivos, es una mezcla de microorganismos con líquidos residuales.</p> <p>Estanques o lagunas de oxidación, estabilización o desecho: los estanques son someros (poca profundidad: de 2 a 4 pies) y tienen oxigenación natural. Las lagunas pueden ser más profundas (dependiendo de si son aeróbicas o anaeróbicas).</p>

**Continuación de la Tabla 8. Ejemplos de procesos realizados en el tratamiento secundario**

Nombre del proceso	Descripción
<b>Aireación prolongada</b>	Es una modificación del proceso convencional de lodos activos, que consiste en disminuir la cantidad de lodo residual aumentando el tiempo de residencia; de esta forma el volumen del reactor es comparativamente mayor que el requerido, por lo que el lodo degradable formado se consume mediante respiración endógena (Ramalho, <i>et al.</i> , 1990).
<b>Estabilización por contacto</b>	El agua residual se mezcla con lodo estabilizado y se somete a aireación en el tanque de contacto inicial, donde se separa una fracción apreciable de DBO (en suspensión y disuelta) mediante bio-absorción. Posteriormente el efluente fluye a un clarificador, se separa el efluente clarificado y se lleva a un tanque de estabilización donde nuevamente es aireada (Ramalho, <i>et al.</i> , 1996).

Fuente: Elaboración propia del autor con base a UNAD, 2015; Ramalho, *et al.*, 1996

○ **Tratamiento terciario**

Serie de procesos físicos y químicos especiales cuyo fin es eliminar contaminantes específicos de las aguas residuales, ya sean nutrientes (fósforo y nitrógeno), metales pesados, compuestos orgánicos recalcitrantes (organoclorados, hidrocarburos bencénicos, fenilicos, DDT, dioxinas) o sólidos disueltos. Generalmente estos tratamientos son más caros que los anteriores y se usan en casos especiales, por ejemplo, para purificar desechos de algunas industrias, algunos ejemplos se muestran en la tabla 9 (EIA, 2015; UNAD, 2015).

**Tabla 9. Ejemplos de procesos realizados en el tratamiento terciario**

Nombre del proceso	Descripción
<b>Filtración</b>	Con lecho de arena, antracita, diatomeas, entre otros
<b>Carbón activo</b>	Consiste en la adsorción, fijación y deposición de moléculas que se acumulan en la superficie del sólido (carbón activo) debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. Este tratamiento se utiliza para eliminar olores y sabores principalmente (Ramalho, <i>et al.</i> , 1996).

### Continuación de la Tabla 9. Ejemplos de procesos realizados en el tratamiento terciario

Nombre del proceso	Descripción
<b>Intercambio iónico</b>	Proceso de desmineralización donde los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas se intercambia por iones de una especie diferente en solución (UNAD, 2015).
<b>Osmosis inversa</b>	Proceso donde el agua se desmineraliza al ser inyectada a altas presiones sobre un conjunto de membranas semipermeables, como las utilizadas en una planta de desalación (Ramalho, <i>et al.</i> , 1996).
<b>Electrodialisis</b>	Es un proceso de separación electroquímica en el que las membranas cargadas y una diferencia de potencial eléctrico se usan para separar especies iónicas y otros componentes no cargados de una solución acuosa (CIDTA, 2015).
<b>Oxidación química (cloración y ozonización)</b>	Consiste en la desinfección del agua, es decir, la inactivación de gérmenes patógenos; por medio de la cloración (uso de cloro) o la ozonización (uso del ozono) (Tejero, <i>et al.</i> , 2015).
<b>Remoción de fósforo</b>	Por medio de remoción con aire, intercambio iónico, nitrificación (aeróbico), desnitrificación (anaeróbico) y biosíntesis (utiliza el nitrógeno para formar más tejido vivo) (UNAD, 2015).
<b>Remoción de Metales pesados</b>	A través de la precipitación con cal para elevar el pH; resinas de intercambio catiónico; electrodisposición; intercambio iónico y cementación (UNAD, 2015).
<b>Remoción de orgánicos recalcitrantes</b>	Eliminados por adsorción con carbón activado; resinas organofílicas; polímeros sintéticos o naturales; oxidación con cloro, ozono y peróxido de hidrógeno (UNAD, 2015).
<b>Remoción de orgánicos recalcitrantes</b>	Eliminados por adsorción con carbón activado; resinas organofílicas; polímeros sintéticos o naturales; oxidación fuerte iónica (con cloro, ozono y peróxido de hidrógeno) (UNAD, 2015).

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a UNAD, 2015.

#### 1.4.2 Tipos de tratamientos para aguas residuales contaminadas con colorantes

Debido a la contaminación ambiental generada por los colorantes, su eliminación es de vital importancia en los procesos para el tratamiento de aguas residuales (Cortazar, 2009). De acuerdo a Gonzáles (2006) cada proceso tiene ventajas y desventajas diferentes, por lo tanto, analizar la composición del agua residual, tipo de colorante, dosificación, costo de los químicos requeridos, costos de operación,

mantenimiento, impacto ambiental y costos por los posibles residuos generados; ayudara a elegir el tratamiento adecuado para ajustarse presupuesto y eliminar el contaminante deseado.

A continuación, se explican algunos de los procesos físicos, químicos, biológicos y combinados (Ver figura 17), que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes:



**Figura 17. Tipos de tratamientos para aguas residuales contaminadas con colorantes**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

### a) Procesos químicos

**Procesos avanzados de oxidación (AOP):** generalmente se utilizan como etapa anterior a los procesos biológicos, ya que su función es oxidar parcialmente a compuestos que puedan ser degradados biológicamente (González, 2006). Los AOP se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes debido a que involucran la generación y uso de especies transitorias con un elevado poder oxidante como el radical libre hidroxilo ( $\text{HO}\cdot$ ), el cual es muy efectivo para la materia orgánica que no es biodegradable (Legrini *et al.*, 1993). El agente oxidante más utilizado para colorantes

es el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), el cual necesita ser activado por diferentes factores. Concluido el AOP el resultado será un anillo aromático clivado de la estructura molecular del colorante (Robinson, *et al*, 2001). Entre los procesos de mayor perspectiva son los de la fotooxidación en sus dos variantes: fotólisis y fotocatalisis (Liu, 2000; Hincapié, 2002; Gómez, 2000).

**Fotólisis:** Los métodos fotolíticos para la degradación de contaminantes disueltos en el agua se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación, que es absorbida por las distintas moléculas para alcanzar estados excitados en el tiempo necesario para experimentar reacciones (Malato, 2001).

**Fotocatalisis solar:** proceso que permite aprovechar directamente la energía solar que llega a la superficie terrestre, provocando la aceleración de una reacción fotoquímica mediante la presencia de un catalizador (sensibilizador), que da lugar a la eliminación de materia orgánica y metales pesados disueltos en las aguas de vertidos urbanos, industriales y agrícolas (Mills, *et al*, 1997; Blesa, *et al.*, 2001).

**Electrolisis:** Proceso que se basa en la aplicación de carga eléctrica a través del agua residual, por medio de electrodos con la finalidad de cambiar la energía química (González, 2006). El proceso sucede en un electrólito, una solución acuosa o sales disueltas que dan la posibilidad a los iones de ser transferidos entre dos electrodos; cuando se aplica la corriente eléctrica los iones positivos migran al cátodo (cationes) y los iones negativos migran al ánodo (aniones). Ubicados en el electrodo, los cationes serán reducidos y los aniones serán oxidados (Lenntech, 2015)

## **b) Procesos biológicos**

Los tratamientos biológicos han sido reconocidos como métodos efectivos para el tratamiento de decoloración y degradación de colorantes en aguas residuales industriales altamente contaminadas, además se consideran amigables con el medio ambiente, de baja producción de lodos y competitivos en cuando a los costos requeridos (Hong, *et al.*, 2007 en Garzón, 2009). Actualmente los sistemas utilizados son sistemas aerobios y anaerobios, con hongos y bacterias para la decoloración y mineralización de los colorantes (Pant *et al.*, 2007). Durante estos procesos, los contaminantes pueden ser metabolizados por los microorganismos por reacciones bioquímicas redox, aunque también puede realizar reacciones de hidroxilación, hidrólisis, des-halogenación y desalquilación (Garzón, 2009).

**Fitorremediación:** Consiste en un conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados; a través de plantas con la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener, degradar o transformar dichas sustancias a formas menos tóxicas (Valero, 2006).

La utilización de plantas acuáticas macrófitas ha sido planteado como un tratamiento secundario o terciario alternativo de aguas residuales y ha demostrado ser eficiente en la remoción de sustancias orgánicas, nutrientes y metales pesados. (Hidalgo, 20015). Además, económicamente los sistemas fáciles de construir y de operar sin necesidad de grandes insumos de energía o maquinaria, representan un ahorro significativo en el tratamiento de aguas residuales (Valero, 2006).

**Tratamientos fúngicos:** Los hongos son ampliamente utilizados en la degradación de compuestos xenobióticos, debido a la capacidad que poseen para degradar compuestos aromáticos complejos, como parte de su metabolismo natural (Garzón, 2009).

El sistema enzimático extracelular de estos organismos, se basa fundamentalmente en la producción de radicales libres, lo que permite que las enzimas sean catalíticamente activas sobre diversos sustratos orgánicos. Las enzimas más

significativas debido a su potente capacidad oxidante son las lacasas, ligninoperoxidasa (LiP), manganeso peroxidasa (MnP), y veratrilperoxidasa (VP) (Bautista, 2011).

**Bisorción:** Consiste en la acumulación de sustancias químicas a través de biomasa microbiana, la cual puede estar viva o muerta; dicho proceso está compuesto por dos fases, una sólida (bisorbente) y una líquida (solvente, que normalmente es el agua); la última contendrá las especies disueltas que serán bisorbidas. El proceso funciona de acuerdo a la afinidad del sorbente por el sorbato, que es atraído hacia el sólido y entrelazado por diferentes mecanismos; el proceso continua hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto enlazado al sólido (Bautista, 2011).

**Proceso de digestión anaerobia:** es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. El proceso de degradación está compuesto 3 etapas: hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis (Lorenzo, 2005).

La hidrólisis consiste en el rompimiento de las moléculas grandes, solubles e insolubles, en moléculas más pequeñas que puedan ser transportadas en la célula y metabolizadas. En la acetogénesis los productos de la hidrólisis se fermentan en ácidos orgánicos y compuestos de bajo peso molecular como  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ , siendo el principal producto el ácido acético. La etapa final de la degradación anaerobia es la metanogénesis, que puede darse por dos rutas: la fermentación de ácido acético a metano y dióxido de carbono por bacterias metanógenas acetofílicas; y la producción de metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono por metanógenas hidrogenofílicas (Droste, 1997).

**Reactores anaerobios:** Se basa en la transformación de la materia orgánica, a través de una serie de reacciones bioquímicas, en un gas cuyos componentes principales son el metano y dióxido de carbono. De acuerdo al tipo de crecimiento

microbiano serán de lecho fijo, formando biopelículas, o de crecimiento libre o suspendido. En el primero la biomasa está constituida por bacterias formando una película sobre un soporte inerte, mientras que el segundo depende de que los microorganismos formen gránulos o flóculos en el reactor. Las bacterias que crecen en suspensión deben formar estructuras que les permitan permanecer en el reactor y no ser lavadas con el efluente. La eficiencia del proceso depende en buena parte de la capacidad del inóculo (lodos/residuos) para formarlas (SINIA, 2015).

### **c) Procesos electroquímicos y mecanismos fisicoquímicos**

**Fotocatálisis heterogénea:** Es un proceso catalítico que se basa en la adsorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV), capaz de excitar a un sólido al grado de hacer que se comporte como un material conductor y provocar reacciones óxido-reducción en la superficie; las cuales generarán radicales libres muy reactivos, al mismo tiempo que reaccionan con las especies a su alrededor, rompiendo el enlace más débil de la molécula, reduciéndolo y oxidándolo hasta convertirlos en especies menos complejas sin que el catalizador sufra cambios químicos (Bautista, 2011).

**Proceso de coagulación-floculación:** Es uno de los procesos más empleados a nivel industrial, consiste en la neutralización de las cargas electrostáticas de las partículas coloidales que permanecen dispersas en el agua residual, con el fin de que éstas se aglomeren y al tener mayor peso o menor densidad, precipiten o floten. Entre los coagulantes más utilizados se encuentran los inorgánicos (Sulfato de aluminio, cloruro férrico y aluminato de sodio), polímeros catiónicos o polielectrolitos (Cheremisinoff, 2002 en González, 2006).

**Adsorción:** proceso que busca la separación de un componente (adsorbible) disuelto en una corriente, gas o líquida, por retención sobre un sólido (adsorbente), por medio de tres mecanismos diferentes: estérico, cinético y de equilibrio. La adsorción se produce por la acción de las fuerzas activas que existen en la superficie del sólido, las cuales provocan la aparición de una fuerza atractiva neta, normal a la superficie del mismo. En función de la naturaleza de estas fuerzas, la adsorción puede ser física (interacciones físicas como las fuerzas de Van der Waals) o química (a través de enlaces químicos) (Mestanza, 2012).

**Ósmosis inversa y ultrafiltración:** Técnicas de desmineralización basadas en la separación de sales y sólidos disueltos a través de membranas, las cuales actúan como barreras permeables selectivas que permiten a algunas sustancias (como el agua) permear a través de ellas mientras retiene a otras disueltas (como iones) (DSS, 2012). Mediante estos procesos se obtiene la eliminación de colorantes básicos, ácidos, directos, dispersos y reactivos (Piña, 2007).

**Ozonización:** Es uno de los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales, ya que es capaz de eliminar compuestos orgánicos, inorgánicos, tóxicos y farmacéuticos; además puede reducir el carbono orgánico total (TOC), olor, color, sabor y turbidez. Se considera como un potente desinfectante debido a su alta reactividad y poder de reducción, pero es necesario su generación “in situ” (mediante “descargas eléctricas silenciosas”) y su coste inicial es alto (Sánchez, 2015).

## **CAPITULO II**

# **Fitorremediación para el tratamiento de agua contaminada por colorantes.**

## **2.1. Biorremediación**

### **2.1.1 Definición y caracterización.**

La biorremediación es el conjunto de estrategias biológicas basadas en la capacidad de los microorganismos para degradar de forma natural ciertos compuestos contaminantes. Dicho término fue acuñado a principios de la década de los 80, y proviene del concepto “remediación”, el cual hace referencia a la aplicación de estrategias físico-químicas que se encargan de evitar el daño y la contaminación en suelos (PQBio, 2006).

A diferencia de la biodegradación que se produce naturalmente, la biorremediación es un proceso iniciado por el hombre derivado de la biotecnología (Valero, 2006), cuyo objetivo es degradar o alterar moléculas orgánicas para transformarlas en moléculas más pequeñas y menos tóxicas a través de microorganismos (Argenbio, 2015).

Este tratamiento ha sido reconocido como un método efectivo para el tratamiento de decoloración y degradación de colorantes en aguas residuales industriales altamente contaminadas, ya que produce una baja cantidad de lodos y es muy competitivo en cuanto a los costos requeridos (Hong, *et al*, 2007 en Garzón, 2009). Actualmente los sistemas utilizados para la biorremediación son los aerobios y anaerobios, con hongos y bacterias para la decoloración y mineralización de los colorantes presentes en dichas aguas (Pant, *et al*. 2007). Durante estos tratamientos bióticos, los contaminantes pueden ser metabolizados por los microorganismos por reacciones bioquímicas redox, aunque también pueden realizar reacciones de hidroxilación, hidrólisis, des-halogenación y desalquilación (Valero, 2006).

El ámbito de aplicación de la Biorremediación puede clasificarse de la siguiente manera (Atlas y Unterman, 1999):

- Sólido: con aplicaciones sobre medios contaminados como suelos o sedimentos, o bien directamente en lodos, residuos, etc.

- Líquido: aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales.
- Gases: emisiones industriales, así como productos derivados del tratamiento de aguas o suelos.

También puede realizarse una clasificación en función de los contaminantes con los que se puede trabajar (Alexander, 1999; Eweis *et al.*, 1999):

- Hidrocarburos de todo tipo (alifáticos, aromáticos, BTEX, PAHs,...).
- Hidrocarburos clorados (PCBs, TCE, PCE, pesticidas, herbicidas,...).
- Compuestos nitroaromáticos (TNT y otros).
- Metales pesados: Estos no se metabolizan por los microorganismos de manera apreciable, pero pueden ser inmovilizados o precipitados.
- Otros contaminantes: Compuestos organofosforados, cianuros, fenoles, etc.

De acuerdo a Sánchez (2015), la aplicabilidad de esta técnica depende de los siguientes factores:

- **Propiedades del contaminante (biodegradabilidad).** Las estructuras más ramificadas son más difíciles de degradar que las cadenas lineales, al producir impedimentos estéricos. Las cadenas ramificadas de sulfonatos de alquilo o arilo a menudo se degradan muy lentamente. Los dobles enlaces hacen la molécula más resistente, así como un incremento del número de anillos bencénicos. Las sustituciones químicas (ácidos dicarboxílicos, nitrilos, metilaciones, halogenaciones) también hacen la molécula más resistente.
- **Presencia de comunidades microbianas adecuadas, con capacidad enzimática para metabolizar el compuesto.** Los microorganismos pueden ser autóctonos (biorremediación intrínseca o atenuación) o añadidos al sistema para mejorar la degradación (bioaugmentación) (Sánchez, 2015).
- **Disponibilidad del contaminante.** Para que la degradación de un contaminante pueda producirse, es necesario que interactúe con la célula en medio acuoso. Inicialmente lo hará con la parte exterior de su pared para posteriormente ser transportado al interior de la misma. La forma más común de transporte es la

complejación con enzimas extracelulares producidos por los microorganismos (Sánchez, 2015).

- **Condiciones del medio contaminado:** Propiedades que permiten o limitan el crecimiento microbiano y el metabolismo del compuesto. A veces es necesario modificar las condiciones, por ejemplo, añadiendo nutrientes o aireando (bioestimulación) (Sánchez, 2015).

### **2.1.2 Tipos de biorremediación**

El proceso de biorremediación puede clasificarse de acuerdo al organismo que efectuó la degradación del compuesto xenobiótico en los siguientes tipos:

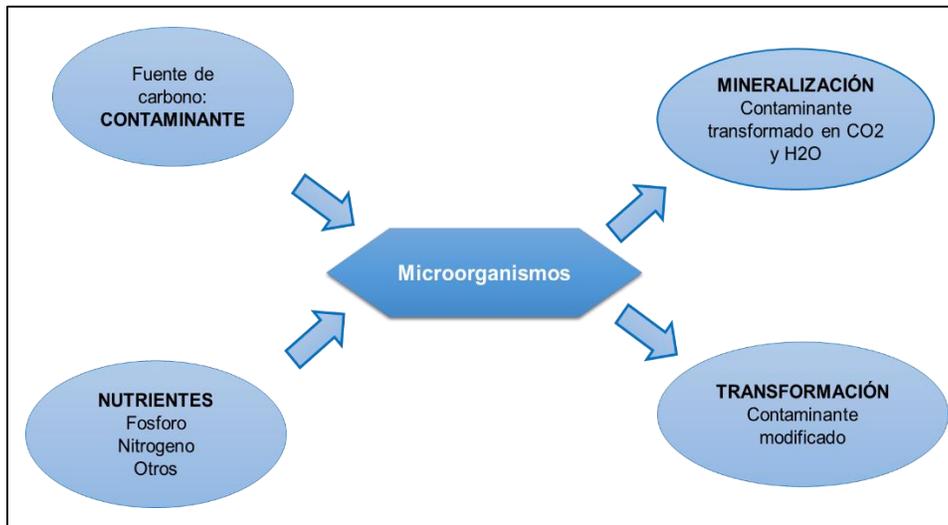
#### **a) Biorremediación enzimática:**

Consiste en el empleo de enzimas para degradar sustancias nocivas; es uno de los tratamientos más efectivos porque las enzimas tienen la capacidad de acelerar los cambios químicos, induciendo reacciones de transformación química con un gasto energético mínimo y con una elevada velocidad de reacción (Valero, 2006).

#### **b) Biorremediación microbiana:**

Se refiere al uso de microorganismos directamente en el foco de la contaminación, los cuales pueden ya existir en ese sitio o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado; cuando no es necesaria la inoculación suelen administrarse más nutrientes, como fósforo y nitrógeno con el fin de acelerar el proceso (Argenbio, 2015).

La descontaminación se produce cuando el metabolismo microbiano ingiere contaminantes como fuente de carbono y algunos nutrientes como fósforo y nitrógeno. De acuerdo a la figura 18 la digestión de estos compuestos los transforma en sustancias más simples como parte del metabolismo, lo cual puede resultar en la degradación del compuesto en forma parcial (transformación) o total a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) (PQBio, 2006).



**Figura 18. Descontaminación por microorganismos**

Fuente: PQBio, 2006

### c) Fitorremediación:

Consiste en el uso de plantas para contener, remover o neutralizar compuestos orgánicos, metales pesados o radionucleidos. (Valero, 2006). Aunque todavía se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos, etc. (Argenbio, 2015).

Tomando en cuenta la planta y el agente contaminante, la fitorremediación puede producirse por (Argenbio, 2015):

- Acumulación del contaminante en las partes aéreas de la planta.
- Absorción, precipitación y concentración del contaminante en raíces.
- Reducción de la movilidad del contaminante para impedir la contaminación de aguas subterráneas o del aire.
- Desarrollo de bacterias y hongos que crecen en las raíces y degradan contaminantes.
- Captación y modificación del contaminante para luego liberarlo a la atmósfera con la transpiración.

- Captación y degradación del contaminante a compuestos menos tóxicos. (por ej. pesticidas, herbicidas, TNT, etc.).

#### **d) Biolixiviación:**

Es la metodología de solubilización de metales a partir de matrices complejas utilizando la acción directa o indirecta de microorganismos (Valero, 2006).

En el caso de los minerales sulfurados de metales de transición, los microorganismos más frecuentemente usados son bacterias quimioautótrofas y mesófilas. El uso de estas especies de bacterias en aplicaciones industriales está asociado directamente a su carácter acidófilo y a los escasos requerimientos de nutrientes e infraestructuras necesarias (debido a que no requieren fuentes orgánicas de energía ni mantenimiento de temperaturas elevadas) lo que permite que el proceso sea económicamente factible para la recuperación de diferentes metales a partir de minerales (Valero, 2006).

#### **e) Biofiltración:**

Los biofiltros remueven y destruyen hidrocarburos aromáticos y alifáticos responsables de los olores de los gases procedentes de descarga de las corrientes del proceso, tanques de venteo, válvulas de seguridad, extracción en suelo con vapor, tratamiento de aguas residuales, etc. (Valero, 2006).

Los filtros son reactores biológicos con capa fija que actúan como oxidantes catalíticos a bajas temperaturas. Como el aire está cargado con contaminantes, fluye lentamente a través de los poros del medio biofiltrante, en donde los microbios residentes consumen los contaminantes y los oxidan generando CO<sub>2</sub> y agua (Valero, 2006).

De acuerdo al lugar de realización, la biorremediación ser in situ o ex situ:

En el tratamiento in situ (conocido como biorremediación intrínseca) se puede estimular la actividad degradativa de los organismos que están presentes en el lugar contaminado a través del suministro de nutrientes (bioestimulación) o también es

posible añadir organismos con propiedades específicas para degradar el contaminante (bioaumentación). Este tipo de tratamiento se realiza cuando los contaminantes han llegado, por ejemplo, a las napas freáticas (Di Paola, 2010).

En el tratamiento *ex situ*, el contaminante es transportado a una planta de procesamiento donde se trata en reactores con microorganismos degradadores especializados. Cuando el contaminante no se puede biodegradar, como sucede con los metales pesados, la estrategia utilizada es la bioacumulación, es decir, la acumulación del contaminante en el interior del organismo que posteriormente es retirado (Di Paola, 2010).

## **2.2 Fitorremediación**

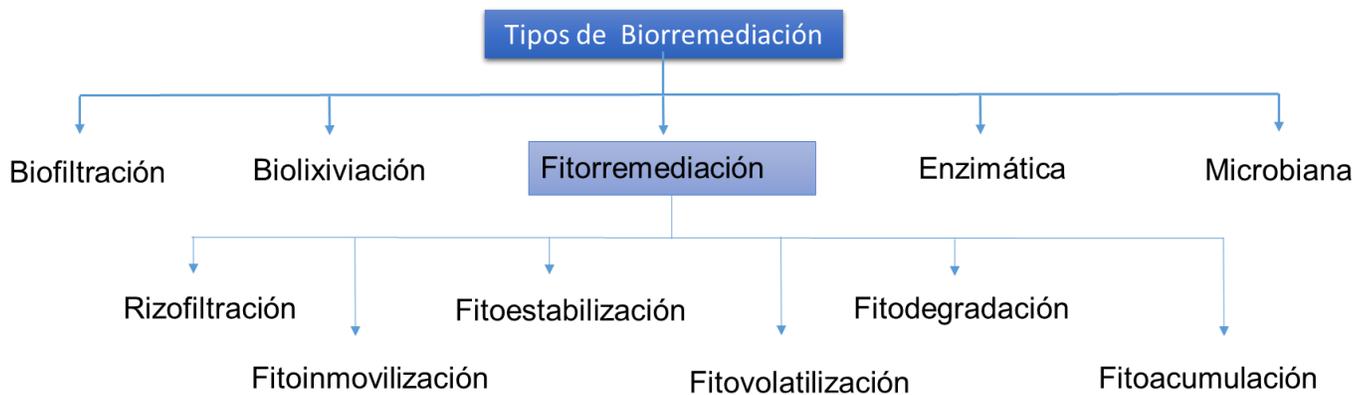
### **2.2.1 Definición y antecedentes**

Se define fitorremediación al conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados, por medio de plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener, degradar o transformar dichas sustancias a formas más simples (Valero, 2006).

Esta fitotecnología reúne un gran número de ventajas, especialmente la limpieza y la economía; pues no utiliza reactivos químicos peligrosos, ni afecta negativamente al ecosistema; ya que solo aplica prácticas agrícolas comunes; además, el proceso se realiza “*in situ*” evitando costos de transportes (Jaramillo y Flores, 2012).

El objetivo de la fitorremediación es mejorar las condiciones del suelo, optimizar la calidad del agua freática, evitar la erosión eólica e hídrica, brindar servicios ambientales útiles para cualquier ecosistema (restauración), proveer el hábitat para especies silvestres y favorecer la captura de CO<sub>2</sub> (Loya, 2013).

Dependiendo de la planta y el agente contaminante, la fitorremediación puede producirse por acumulación absorción, precipitación y concentración del contaminante en raíces o reducción de la movilidad del contaminante (Di Paola, 2010) (Ver figura 19).



**Figura 19. Tipos de Fitorremediación**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

### 2.2.2 Tipos de fitorremediación

Existen 2 clasificaciones para la fitorremediación, la primera es de acuerdo al tipo de degradación en la planta, es decir “in planta” y “ex planta”; o de acuerdo a la forma en la que se realice la degradación. En la degradación “in planta”, la planta absorbe el contaminante y lo incluye dentro de ella; mientras que en “ex planta” la degradación se realiza en la zona de la rizosfera, debido a los exudados radicales y a la mayor actividad que existe en la zona (Hutchinson *et al.*, 2001).

La segunda clasificación corresponde a la realizada por Thangavel y Subhram (2004), en la que, dependiendo del tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido; la fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoimmobilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización) (Delgadillo, 2011). Las cuales se explican a continuación:

**a) La rizofiltración**, consiste en absorber o acumular contaminantes del medio hídrico a través de la raíz (Dushenkov *et al.*, 1995).

**b) Fitoestabilización**, permite inmovilizar contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces o bien, por precipitación en la zona de la rizosfera (Delgadillo, 2011; Loya, 2013).

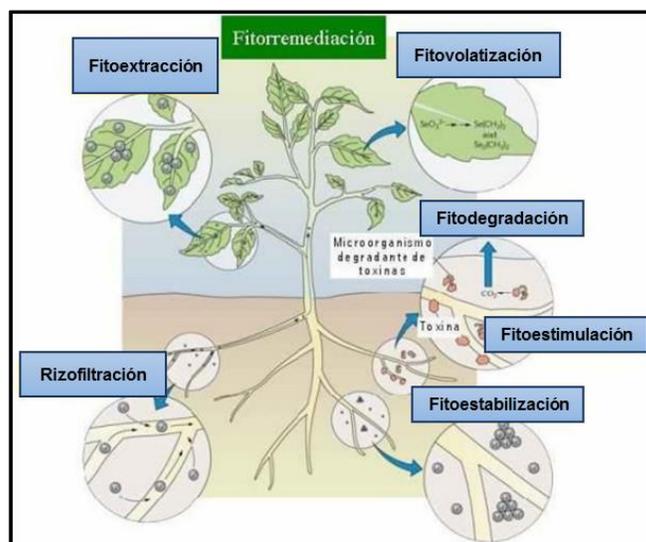
**c) Fitoimmobilización**, es el proceso encargado de la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, que se encargan de inactivar las sustancias tóxicas por procesos de absorción, adsorción o precipitación (Carpena y Bernal, 2007).

**d) Fitodegradación**, en este proceso los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales, produciendo enzimas como la dehalogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación (Singh y Jain, 2003).

**e) Fitoextracción fitoacumulación**, consiste en la absorción de contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas (Loya, 2013).

**f) Fitovolatilización**, se produce cuando las plantas y la actividad microbiana transforman, degradan, evaporizan y volatilizan los contaminantes orgánicos e inorgánicos a la atmósfera (Loya, 2013; Delgadillo, 2011).

Tal y como se explicó, las plantas pueden incorporar diferentes sustancias contaminantes (ver tabla 10) mediante distintos procesos; los cuales se representan en la figura 20:



**Figura 20. Tipos de fitorremediación**  
Fuente: PQBio, 2006

**Tabla 10. Contaminación tratada por la fitorremediación**

<b>Tipo</b>	<b>Mecanismo</b>	<b>Contaminación tratada</b>
<b>Fitoextracción</b>	Hiperacumulación en hojas y raíces	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc.
<b>Rizofiltración</b>	Uso de raíces para absorber, precipitar y concentrar compuestos orgánicos e inorgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc, isótopos radioactivos, compuestos fenólicos.
<b>Fitoestabilización</b>	Complejación	Lagunas de desecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
<b>Fitoestimulación</b>	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
<b>Fitovolatilización</b>	Volatilización a través de transpiración de las hojas	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
<b>Fitodegradación</b>	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a Di Paola, 2010.

### 2.2.3 Ventajas y desventajas de la fitorremediación

La fitorremediación, por sí misma, muestra una serie de ventajas y limitaciones en comparación con otras tecnologías convencionales, las cuales se mencionan en la Tabla 11:

**Tabla 11. Ventajas y desventajas de la fitorremediación.**

<b>Fitorremediación</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<p>1.- Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos.</p> <p>2.- Se realiza sin necesidad de transportar el sustrato contaminado, con lo que se disminuye la diseminación de contaminantes.</p> <p>3.- Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable.</p> <p>4.- Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos.</p> <p>5.- Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal.</p> <p>6.- Sólo requiere de prácticas agronómicas convencionales.</p> <p>7.- No requiere personal especializado para su manejo.</p> <p>8.- Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales).</p> <p>9.- Evita la excavación y el tráfico pesado.</p> <p>10.- Se puede realizar <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>.</p> <p>11. - Es de bajo costo.</p> <p>12.- Es poco perjudicial para el ambiente.</p> <p>13.- No requiere consumo de energía eléctrica.</p>	<p>1.- La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.</p> <p>2.- Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados en comparación con las tecnologías convencionales como las lagunas de sedimentación.</p> <p>3.- El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas.</p> <p>4.- Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión.</p> <p>5.- La fitotoxicidad definida como la capacidad de un compuesto o elemento químico de provocar un daño temporal o permanente en una planta es una limitante en áreas fuertemente contaminadas.</p> <p>6.- En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.</p> <p>7.- En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente.</p> <p>8.- No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.</p>

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a Delgadillo, 2011

Como se observa existen más ventajas que desventajas las cuales favorecen la aplicación de fitorremediación, sin embargo, lo que ha impulsado el desarrollo de esta, ha sido su bajo costo (a comparación de los tratamientos convencionales). Por ejemplo, mientras un tratamiento convencional para hidrocarburos en el suelo costaba \$500,000 pesos en 2009, la degradación de los mismos por medio de

fitorremediación costaba solamente \$50,000 o \$100,000 pesos, por lo tanto, se dice que el ahorro podía llegar a ser hasta de un 80% (Delgadillo, 2011) (Ver tabla 12).

**Tabla 12. Ejemplo de métodos de remediación. Comparación de costos.**

Caso	Tratamiento con fitorremediación	Costo (miles de pesos)	Tratamiento convencional	Costo (miles de pesos)	Ahorro proyectado
<b>Pb en suelo, 0.405 ha</b>	Extracción, recolección y disposición	\$150-200	Excavación y disposición	\$500	50-65%
<b>Hidrocarburos en suelo, 0.405 ha</b>	Degradación <i>in situ</i>	\$50-100	Excavación incineración y disposición	\$500	80%

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a Valero, 2006

Respecto a las ventajas y desventajas de las macrófitas acuáticas que se pretenden utilizar para la fitorremediación en esta investigación, se destacan las siguientes:

*Ventajas.* Uno de los beneficios es que pueden ser utilizadas como fertilizantes, como alimento para el ganado y animales acuáticos; como fuente de producción de bio-gas y celulosa, así como también para fines de uso medicinal y como agente purificador de agua (Margalef, R., 1991; Wetzel, R., 1981).

*Desventajas.* Entre los inconvenientes relacionados con la presencia de macrófitas en el agua se mencionan los siguientes: pueden actuar como fuente de vectores, propagadores de enfermedades y plagas, favorecen la ausencia de oxígeno, producen sombra a plantas sumergidas, debido a su descomposición acumulan materia orgánica en el sedimento volviéndolo anóxico. Algunos problemas que estas plantas pueden generar para el ser humanos es el taponamiento de canales de riego o navegación y problemas en represas, puentes y obras de ingeniería en general (Margalef, R., 1991; Wetzel, R., 1981).

Sin embargo, a pesar de los problemas que se pueden generar cuando se reproducen en exceso, la importancia de la especie en el ecosistema acuático es que son mediadoras de transporte entre los sedimentos y la atmósfera, así como también entre el mundo inorgánico y la comunidad biótica, además, estas especies

generan alimento y dan refugio a la macrofauna, eliminan el exceso de nutrientes y se encargan de estabilizar los sedimentos disminuyendo la velocidad de corriente (Margalef, R., 1991; Wetzel, R., 1981).

#### **2.2.4 Antecedentes de la fitorremediación para el tratamiento de agua**

Gracias a los excelentes resultados que ofrece la fitorremediación, esta se ha propuesto como tratamiento primario en diferentes proyectos de investigación a nivel mundial, nacional y estatal, a continuación, se describen algunos:

En Ecuador, la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, realizó un estudio sobre la absorción de mercurio utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemnaminor*; al final del tratamiento el Jacinto de agua removi6 aproximadamente 70% de mercurio (Jaramillo, 2012). En Chile, la planta "Tratagua Dalag" elabor6 un sistema de tratamiento formado por un desarenador y dos piscinas, la funci6n del Jacinto de agua fue la retenci6n de contaminantes orgánicos en sus tejidos y la eliminaci6n del 80% de detergentes diluidos en el agua (Tratagua, 2012).

Algunos ejemplos de investigaciones realizadas en M6xico son: "*Fitorremediaci6n: una alternativa para eliminar la contaminaci6n*" elaborado por la Universidad Aut6noma del Estado de Hidalgo, donde se presentaron diversas t6cnicas y tecnologías fitocorrectivas para restaurar suelos y efluentes contaminados (Delgadillo, 2011). En 2011 la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Aut6noma de M6xico (UNAM), hizo una investigaci6n para estudiar la posibilidad de usar Jacinto de agua en el lago de Xochimilco, con la finalidad de absorber metales pesados, los resultados mostraron que la planta tenia los coeficientes de bioacumulaci6n necesarios para removerlos (Carri6n, 2011).

En el Estado de M6xico tambi6n se han realizado investigaciones sobre fitorremediaci6n como tratamiento principal o auxiliar para aguas residuales; algunas de estas han sido por parte de la Universidad Aut6noma del Estado de M6xico (UAEM). Para citar algunos ejemplos se presenta los siguientes t6tulos: "Fitorremediaci6n con *Myriophyllum Aquaticu* en Aguas Residuales Industriales pretratadas con Electrocoagulaci6n" (Cano, 2009); "*Phaseolus vulgaris* inoculado

con *Rhizobium* y bacterias degradadoras de hidrocarburos del diesel con fines de fitorremediación” (Ballesteros, 2011); y “Remoción de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales industriales empleando métodos electroquímicos y fitorremediación” (Cano, 2014).

Asimismo, en la Facultad de Planeación Urbana y Regional algunas investigaciones realizadas por alumnos de la Licenciatura en Ciencias Ambientales también están relacionadas con la fitorremediación, por ejemplo, la realizada por Torres (2011) titulada “Absorción de Metales Pesados por Lirio Acuático en Cuerpos de Agua del Valle de Toluca”.

Tomando como referencia este estudio podemos plantear de inicio que, la fitorremediación empleada como tratamiento de aguas residuales es un método comprobado por diferentes instituciones y centros de investigación con resultados extraordinarios; sin embargo, no se encontró ninguna investigación que tratara aguas residuales contaminadas con colorantes, por lo tanto, se propone el uso de la fitorremediación para disminuir la concentración del color azul de metileno empleando una macrófita acuática.

## **2.3 Plantas Macrófitas**

### **2.3.1 Descripción general**

Las plantas conocidas como Macrófitas son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados de forma permanente o durante largos periodos de tiempo en condiciones de encharcamiento. También se conocen con plantas palustres y su porte alcanza cierta importancia, ya que se pueden encontrar especies entre los (30-120 cm) en los juncos, (60-130cm) en los esparganios, (120-240 cm) en las enneas y en los carrizos (160-320 cm) (Valero, 2006).

Estas plantas pueden encontrarse en terrenos inundados e inundables con láminas de agua de poca altura o humedales que soportan aportes de origen fluvial y con una dinámica de inundaciones de origen pluvial, que aportan importantes cantidades de materia orgánica e inorgánica, (es normal encontrarlas a las salidas

de los efluentes de las depuradoras o en corrientes establecidas de aguas no tratadas del tipo urbano o ganadero) (Valero, 2006).

Las plantas acuáticas han sido consideradas por mucho tiempo como malezas, debido a que con frecuencia impiden o dificultan las actividades humanas: cubren grandes extensiones de embalses, obstaculizan la irrigación y la pesca, ocasionan problemas a la acuicultura e imposibilitan el transporte fluvial (Valero, 2006).

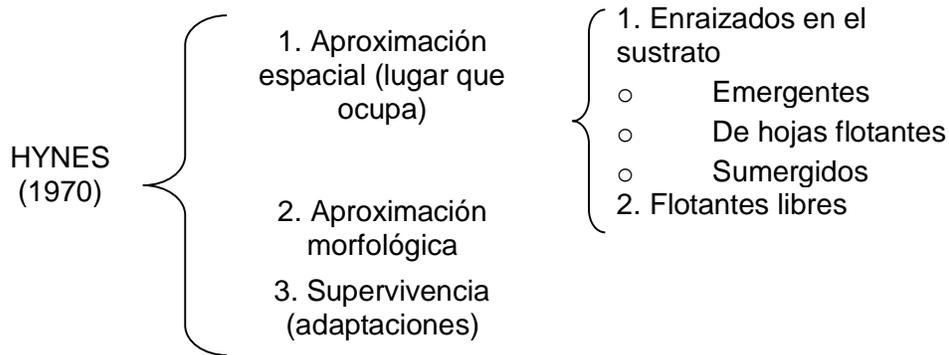
Generalmente las macrófitas acuáticas presentan altas tasas de crecimiento y de reproducción, lo que favorece su capacidad de absorber sustancias disueltas en el agua y transformarlas en biomasa, con un consecuente efecto depurador del agua donde crecen. Esto ha conducido a evaluar su capacidad depuradora y la posibilidad de utilizarlas como parte de tratamiento de aguas residuales (Valero, 2006).

Infinidad de investigadores han evaluado a las macrófitas con el fin de determinar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Una de las especies más estudiadas hasta el momento ha sido el Jacinto de agua "*Eichhornia Crassipes*"; esta especie es considerada una maleza incontrolable por su impresionante productividad; por ejemplo, se calcula que 10 plantas pueden producir 600,000 más en 8 meses, sin embargo, esta planta ha resultado ser justamente una de las más eficientes en la remoción de nutrientes y materia orgánica del agua residual por su elevada tasa fotosintética (Valero, 2006).

En numerosas investigaciones realizadas se ha demostrado que *Eichhornia Crassipes* puede eliminar hasta el 97% de materia orgánica expresada como DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos, 99% de nitrógeno y entre el 60-65% de fósforo, así como organismos patógenos, sustancias tóxicas e incluso metales pesados. Las variaciones en la eficiencia de la remoción dependen de las condiciones climáticas y de las características de la laguna donde se encuentren, como profundidad, caudal, concentración del agua residual y tiempo de retención hidráulica (Valero, 2006).

### 2.3.2 Especies macrófitas

En 1970 Hynes clasificó las especies macrófitas tomando en cuenta su morfología, capacidad de supervivencia y su aproximación espacial; esta última dividida en dos, en las plantas enraizadas al sustrato y plantas flotantes libres (Ver figura 21).



**Figura 21. Clasificación de macrófitas elaborada por Hynes**

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a Hynes, 2016

Las macrófitas **fijas al sustrato** se dividen en tres tipos:

- **Macrófitas emergentes:** son las que se desarrollan en suelos anegados permanentes o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos.
- **Macrófitas de hojas flotantes:** principalmente angiospermas; sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos.
- **Macrófitas sumergidas:** comprenden algunos helechos, numerosos musgos, macrófitas y angiospermas. Se encuentran en la zona fótica (hasta los 10 m. de profundidad), los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.

Las macrófitas **flotantes libres** son las especies que presentan formas muy diversas desde plantas de gran tamaño con raíces sumergidas bien desarrolladas, hasta pequeñas plantas que flotan en la superficie con muy pocas raíces o ninguna. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos pero muy raramente están sumergidos (Margalef, R., 1991; Wetzel, R., 1981).

Desde el punto de vista funcional, las macrófitas pueden clasificarse en diferentes categorías atendiendo a la relación de la especie con el medio en el que vive y a su forma de crecimiento:

**a) Hidrófitos o macrófitos acuáticos en sentido estricto:** aquellas plantas que tienen todas sus estructuras vegetativas sumergidas o flotantes. En este grupo se incluyen a plantas vasculares, algunos géneros de briófitos y algas carófitas o filamentosas. Se encuentran enraizados al sustrato y flotan libremente en el agua. Son los mejores indicadores del estado de su hábitat. Ejemplos: espigas de agua (todas las especies de *Potamogeton*), miriofilo (*Myriophyllum spicatum*), jopozorra (*Ceratophyllum demersum*), lentejas de agua (*Lemna*), nenúfares (*Nymphaea alba* y *Nuphar luteum*), entre otros (Molina, 2006).

**b) Helófitos:** plantas acuáticas de lugares encharcados con la mayor parte de su aparato vegetativo (hojas, tallos y flores) emergentes. Se localizan en los bordes de las lagunas, charcas y zonas inundables no muy profundas. Suelen presentar un sistema de rizomas que permite la expansión subterránea de los individuos, que pueden colonizar rápidamente las áreas donde viven. Poseen un menor valor como indicadores de calidad del ecosistema que los hidrófitos. Ejemplos: carrizo (*Phragmites australis*), enea (*Typhadomingensis*), junco de laguna (*Schoenoplectus lacustris*), castañuela (*Boluschoenus maritimus*) y junco florido (*Butomus umbellatus*) (Molina, 2006).

**c) Higrófitos o plantas de borde:** plantas que se sitúan sobre suelos húmedos en los bordes de los humedales, y que suelen acompañar a los helófitos. Ejemplos: apio borde (*Apium nodiflorum*) y berro (*Rorippa nasturtium-aquaticum*) (Molina, 2006).

### **2.3.3 Acción depuradora de las plantas acuáticas**

Como ya se ha venido mencionado con anterioridad, las plantas acuáticas pueden ayudar a disminuir la concentración de nutrientes, metales pesados y derivados de hidrocarburos (Valero, 2006), a través de procesos físicos, químicos y biológicos que se originan en el agua debido a la interacción entre suelo, planta, agua y contaminante (Loya, 2003).

A continuación, se explica de manera general algunos de los procesos externos e internos que generan las macrófitas para sintetizar contaminantes.

Los procesos externos realizados para la disminución de contaminantes pueden ser originados por las hojas o las raíces. Cuando las hojas sobre la superficie forman una cubierta aislante en la interface aire-agua, se reduce la turbulencia del agua lo que evita la mezcla de contaminantes y aumenta la sedimentación de la materia orgánica(Valderrama, 1997); además se impide la penetración de la luz, factor que favorece a la eliminación de microalgas causantes de las altas concentraciones de sólidos suspendidos en los efluentes y reduce significativamente las concentraciones de nutrientes en el agua residual, siempre y cuando la biomasa formada sea removida con frecuencia. Esto último constituye una herramienta de gran importancia para el control de la eutrofización (Valero, 2006).

Aunado a lo anterior, en la rizósfera (área de la planta que comprende la raíz y los tres milímetros que la rodean) se juega un papel muy importante para la degradación de contaminantes, ya que uno de sus objetivos es construir un hábitat favorable para albergar a los organismos degradadores (Martínez, *et al.*, 2007). Lo anterior por medio de la liberación de oxígeno y fotosintato dentro del suelo en forma de exudado radicular, constituido por azúcares, ácidos alifáticos, aminoácidos, ácidos aromáticos, compuestos fenólicos, ácidos grasos, esteroides y enzimas; que sumados a la humedad y a las características del suelo crean condiciones ideales para el desarrollo de bacterias y hongos que intervienen en la biodegradación de contaminantes (Torres y Zuluaga, 2009).

De manera interna, una vez que los contaminantes se encuentran dentro de la planta; es decir, que atravesaron el sistema radicular; pueden trasladarse hacia brotes y hojas para posteriormente volatilizarse, o pueden sufrir procesos de metabolización hacia nuevas formas. Estos nuevos compuestos pueden mineralizarse o pueden acumularse como nutrientes o como nuevos contaminantes. La inclusión en órganos subcelulares y la formación de otros compuestos representan las principales vías para la desintoxicación de xenobióticos en plantas (Torres y Zuluaga, 2009).

### 2.3.4 Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)

#### 2.3.4.1 Descripción

El Jacinto de agua conocido como lirio de agua, camalote o lechugin pertenece al grupo de las macrófitas acuáticas (ver tabla 13); es una planta acuática perenne, vascular flotante no enraizada muy común en ambientes acuáticos de climas tropicales donde llega a considerarse como planta invasiva. Su origen corresponde a la región amazónica, pero actualmente está extendida en prácticamente todas las zonas tropicales acuáticas del planeta (Valero, 2006).

**Tabla 13. Taxonomía del Jacinto de Agua**

Reino	Vegetal
<b>Clase</b>	Liliopsida
<b>Orden</b>	Pontederiales
<b>Familia</b>	Pontederiaceae
<b>Género</b>	Eichornia
<b>Especie</b>	Crassipes

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a Valero, 2006.

Puede duplicar su tamaño en diez días, se dice que durante ocho meses decrecimiento una sola planta es capaz de reproducir 70,000 plantas hijas, que pueden llegar a medir 0.5 a 1.5 metros desde la parte superior hasta la raíz (Romero, 2004). La hoja es de consistencia esponjosa con gran espacio aéreo, lo que

contribuye a la flotabilidad; el limbo es coriáceo, erecto, de dimensiones aproximadas 8 x 10 cm y de color verde brillante. La planta desarrolla un tallo floral erecto, que lleva en su extremo una inflorescencia semejante a una espiga vistosa, con unas 15 flores efímeras de coloración azulada (Fernández, 2006).

Cada flor dura abierta sólo un día; pues se abre a la salida del sol, y se cierra al anochecer. Consta de 6 pétalos de color azul claro a azul amarillento, 6 estambres de dos longitudes diferentes, gineceo de 3 lóculos y estilo con estigma trilobulado. El fruto es una cápsula alargada, que contiene un número variable de semillas (una cápsula puede llegar a contener 450 semillas) de pequeño tamaño (García, 2012). En la parte sumergida de la planta se sitúan las raíces, que son de aspecto plumoso, muy densas, y de color negro-púrpura por los pigmentos que contienen, las cuales sirven de protección frente a herbívoros. Las raíces son adventicias, fibrosas, y pueden alcanzar los 3 m de longitud. Además, en la parte sumergida de la planta se desarrollan estolones, de hasta 30 cm de longitud que sirven para la propagación vegetativa de la especie (Fernández, 2006).

El componente físico principal de la planta es el agua entre 93% y 95% de la masa total (Romero, 2004), mientras que en su composición química el carbohidrato, la proteína cruda y la fibra son sus constituyentes principales (Ver tabla 14).

**Tabla 14. Composición química del Jacinto de agua**

Constituyente	% de masa seca	
	Promedio	Intervalo
<b>Proteína cruda</b>	18.1	9,7 - 23,4
<b>Grasa</b>	1.9	1,6 - 2,2
<b>Fibra</b>	18.6	17,1 - 19,5
<b>Ceniza</b>	16.6	11,1 - 20,4
<b>Carbohidrato</b>	44.8	36,9 - 51,6
<b>NTK</b>	2.9	1,6 -3,7
<b>Fósforo</b>	0.6	0,3 - 0,9

Fuente: Elaborada por el propio autor con base a Valero, 2006.

#### **2.3.4.2 Ciclo de desarrollo**

La planta se reproduce principalmente por propagación vegetativa, esto es, mediante estolones que radian desde base de la planta y desarrollan renuevos. También puede reproducirse mediante semilla, la cual constituye una fuente de re-forestación cuando se erradica la población. En climas tropicales la producción de estolones y renuevos es constante. Normalmente, en una población densa (tapiz) de plantas de Jacinto de agua sólo desarrollan estolones las plantas que están en los límites externos de la agrupación, con lo que el tapiz va extendiéndose progresivamente a modo de mancha de aceite (Fernández, 2006).

Las características de rápido crecimiento y alta productividad hacen que en cursos de agua naturales y en determinadas circunstancias pueda llegar a ser un grave problema. “Sin embargo, estas características son muy ventajosas cuando se utiliza en ambientes controlados para el tratamiento de aguas residuales” (Fernández, 2006).

Esta especie macrófita puede tolerar fluctuaciones grandes con respecto a la altura de la capa de agua, velocidad del flujo, disponibilidad de nutrientes, pH, contaminación y salinidad. La principal limitante para el desarrollo del Jacinto de agua es la temperatura, que debe mantenerse dentro de los límites usuales del régimen tropical o subtropical. El crecimiento es rápido en el entorno de 20-30°C de temperaturas medias, pero se estanca en el intervalo de 8-15°C. También la formación del fruto está estrechamente relacionada con las condiciones ambientales; es muy reducida cuando las temperaturas son muy altas y la humedad relativa es baja. Las condiciones óptimas para su desarrollo son 90% de humedad relativa y 22.5- 35°C (Fernández, 2006).

#### **2.3.4.3 Campos de aplicación**

El Jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*) es una de las especies acuáticas más estudiadas, debido a sus características depuradoras y facilidad de proliferación, especialmente en regiones tropicales y subtropicales (Valero, 2006).

Esta planta obtiene del agua todos los nutrientes que requiere para su metabolismo; sus raíces pueden alojar microorganismos que asociados a ellas favorecen su acción depuradora. En general, estas plantas son capaces de retener en sus tejidos una gran variedad de metales pesados como Cadmio, Mercurio y Arsénico (Valero, 2006).

El Jacinto acuático puede remover algunos compuestos orgánicos, como fenoles, ácido fórmico, colorantes y pesticidas, además contribuye a la disminución de niveles de DBO<sub>5</sub>, DQO y sólidos suspendidos (Valero, 2006).

En numerosas investigaciones realizadas con esta especie se ha demostrado que la *Eichhornia Crassipes* puede eliminar del agua hasta el 97% de materia orgánica (expresada como DBO<sub>5</sub> y sólidos suspendidos), el 99% de nitrógeno y organismos patógenos, sustancias tóxicas e incluso metales pesados (Valero, 2006).

Debido a lo anterior, actualmente el Jacinto de agua es utilizado en sistemas acuáticos de tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas de climas cálidos, siendo el principal parámetro de diseño la carga orgánica. En tratamientos secundarios no aireados la carga típica de DBO<sub>5</sub> está en el intervalo de 40-80 kg/ha/día. También puede aplicarse como tratamiento terciario para la remoción de nitrógeno y fósforo. Su eficacia dependerá del grado de cobertura alcanzado, es decir, de su rendimiento en biomasa. (Fernández, 2006).

# **CAPITULO III**

## **Normatividad.**

### **3.1 Normatividad aplicable a los colorantes**

Hoy en día el uso, manejo y disposición final de los colorantes es un tema que debería ser considerado en la legislación, sin embargo, en la mayoría de los países únicamente están regulados a través de leyes o normas de salud que controlan la cantidad y tipo de colorantes en alimentos y bebidas. Para cuestiones ambientales son pocos los países que consideran el color como un factor de contaminación, por lo que la normatividad ambiental dirigida a ellos es poca o nula en algunos casos.

A nivel internacional los países desarrollados y algunos en vías de desarrollo son los que se han encargado de construir una normatividad aplicable a colorantes. Por ejemplo, en 1974 se estableció en cooperación con el gobierno suizo la “Asociación Ecológica y Toxicológica de la industria de colorantes” (ETAD, por sus siglas en inglés), cuyo fin continúa siendo el de representar los intereses de los fabricantes de colorantes y pigmentos; así como también coordinar esfuerzos de todos los miembros para proteger la salud y el medio ambiente de los impactos toxicológicos que producen los colorantes (Alatorre, 2007).

En octubre de 1976 el gobierno de Estados Unidos junto con la Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) elaboraron la “Ley para el control de sustancias tóxicas de los Estados Unidos de América” cuyo objetivo fue proteger la salud humana y el ambiente a través de requerir a las industrias la evaluación toxicológica de sus productos previa a su fabricación, además de regular la fabricación, uso, importación y eliminación de sustancias químicas y establecer la autoridad para controlar, prohibir, restringir y reglamentar productos químicos, donde se contemplan a los colorantes artificiales (EHP, 2013).

El 20 de julio de 1995 la normatividad alemana emitió un listado con las 20 aminas aromáticas más peligrosas por su efecto cancerígeno y prohibió el uso de los colorantes que tuvieran la capacidad de liberar alguna de ellas. Además, se publicaron los valores permitidos para las descargas de aguas residuales textiles de la industria textil alemana (Ver tabla 15), (Alatorre, 2010).

**Tabla 15: Parámetros y valores permisibles para las descargas de agua residual de la industria textil alemana (1986).**

Parámetro	Valor
DFZ a 436nm (amarillo), m-1	7
DFZ a 525nm (rojo), m-1	5
DFZ a 620nm (azul), m-1	3
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	25
Demanda química de oxígeno (mg/L)	160
Compuestos orgánicos halogenados (mg/L)	0.5
Compuestos aromáticos (Benceno, fenol, entre otros) (mg/L)	0.1
Cromo, Cobre, Níquel para cada uno	0.5
Fosforo (mg/L)	2

Fuente: Alatorre, 2010

En Reino Unido desde 1997 la política ambiental exige que ningún compuesto químico sintético puede ser descargado al ambiente marino. En Gran Bretaña la remoción de colorantes de las descargas de efluentes industriales es normada por la normatividad de la Agencia Ambiental de Inglaterra, Gales, y la de la Agencia de Protección Ambiental de Escocia (Alatorre, 2010).

En noviembre de 2004 el gobierno de España basado en la normativa de la Unión Europea modificó el Anexo I del Real Decreto 1406/1989, donde se estableció una serie de limitaciones a la comercialización y uso de determinadas sustancias con el fin de aumentar los niveles de protección a la salud humana y del medio ambiente. Una de estas modificaciones fue prohibir el uso de colorantes azoicos cuya concentración de aminas aromáticas rebasara las 30 ppm en artículos textiles o de cuero que pudieran entrar en contacto directo y prolongado con la piel humana o la cavidad bucal (Real Decreto 1406/1989, 2004).

Para el caso de México, en 1993 se creó la NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establecía los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil (ver tabla 16), y en 1994 surgió la NOM-065-ECOL-1994, que establecía los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de las industrias de pigmentos y colorantes (INECC, 2007).

**Tabla 16. Parámetros y límites máximos permisibles para las descargas de agua residual de la industria textil mexicana establecidos por la NOM-CCA-014-ECOL/1993.**

Parámetros	Límites máximos permisibles	
	Promedio diario	Instantáneo
pH	6-9	6-9
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)</b>	100	120
<b>Demanda Química de Oxígeno (mg/L)</b>	200	240
<b>Sólidos sedimentables (mg/L)</b>	1.0	1.2
<b>Grasas y aceites</b>	20	20
<b>Sólidos suspendidos totales (mg/L)</b>	100	120
<b>Cromo Total (mg/L)</b>	1.0	1.2
<b>Sulfuros (mg/L)</b>	0.2	0.4
<b>Fenoles (mg/L)</b>	0.1	0.2
<b>Coliformes totales (número más probable por cada 100 mL)</b>	1000	1000

Fuente: Diario Oficial de la Federación, 18 de octubre de 1993.

Sin embargo, en 1996 la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) reemplazo la NOM-CCA-014-ECOL/1993 por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996; las cuales establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal respectivamente (Alatorre, 2010).

En la tabla 17 se muestran los límites máximos permisibles para descargas de agua a ríos, embalses naturales o artificiales, aguas costeras y suelo, establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

**Tabla 17. Límites máximos permisibles para descargas de agua establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996**

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																				
Parámetros	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras						Suelo			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
mg/L excepto cuando se especifique)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura a °C (1)	N.A.	N.A.	40		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	ausente		ausente		ausente		ausente		ausente		ausente		ausente		ausente		ausente		ausente	
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

(1) Instantáneo

(2) Muestra simple promedio ponderado

(3) Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006

(4) P.D.= promedio diario; P.M.= promedio mensual; N.A.= No aplica

(A), (B), (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos

Fuente: Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 2003

A continuación, en la tabla 18 se comparan algunos de los límites máximos permisibles de las normas emitidas por el ECOL y la SEMARNAT:

**Tabla 18. Límites máximos permisibles de contaminantes básicos de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas CCA-014-ECOL/1993; NOM-65-ECOL-1994; 001-SEMARNAT-1996 y 002-SEMARNAT-1996 (Promedio diario).**

Normas aplicables	pH (unidades de pH)	Demanda química de oxígeno (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Sólidos sedimentables (ml/L)	Sólidos suspendidos (mg/L)	*Demanda bioquímica de oxígeno <sub>5</sub> (mg/L)
NOM-CCA-014-ECOL/1993	6-9	200-240	20-30	1.0 - 1.2	100-120	100
NOM-065-ECOL-1994	6-9	300	40	1	200	-
NOM-001-SEMARNAT-1996	5-10*	-	15-25*	1-2*	40-200 *	30-200*
NOM-002-SEMARNAT-1996	5-10	-	75	7.5	-	-

\* Rango de límites máximos permisibles para contaminantes básicos en ríos NOM-001-SEMARNAT  
 Fuente: Elaborada por el propio autor con base a las Normas Oficiales Mexicanas, 2016

Respecto al cuidado y protección de la salud en México la Secretaría de Salud (SSA) es la encargada de contribuir al desarrollo humano mediante la promoción de salud y acceso universal a servicios o productos de alta calidad que satisfagan las necesidades de la población mexicana (SSA, 2016).

Por lo anterior, la regularización de colorantes artificiales para la elaboración de productos de consumo humano, es un tema que le compete a esta Secretaría. Entre las Normas Oficiales Mexicanas en las que ha regulado en uso y consumo de colorantes se mencionan las siguientes: NOM-036-SSA1-1993, NOM-086-SSA1-1994, NOM-120-SSA1-1994, NOM-131-SSA1-1995, NOM-147-SSA1-1996, NOM-185-SSA1-2002, NOM-213-SSA1-2002 y la NOM-038-SSA1-1993 que establece las definiciones, especificaciones de identidad y pureza de los colorantes orgánicos sintéticos para su aplicación en los alimentos, productos de perfumería y belleza.

Asimismo, la Secretaría de Salud en 1994 publicó la NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y

tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"; en la que expone que el límite permisible de color en el agua es de 20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto (SS, 1994).

Aunado a lo anterior, en 2002 la Secretaria también publicó la NOM-201-SSA1-2002, "Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias", donde se explica que estos productos no pueden contener más de 15 unidades de color verdadero en la escala de platino cobalto (SS, 2002).

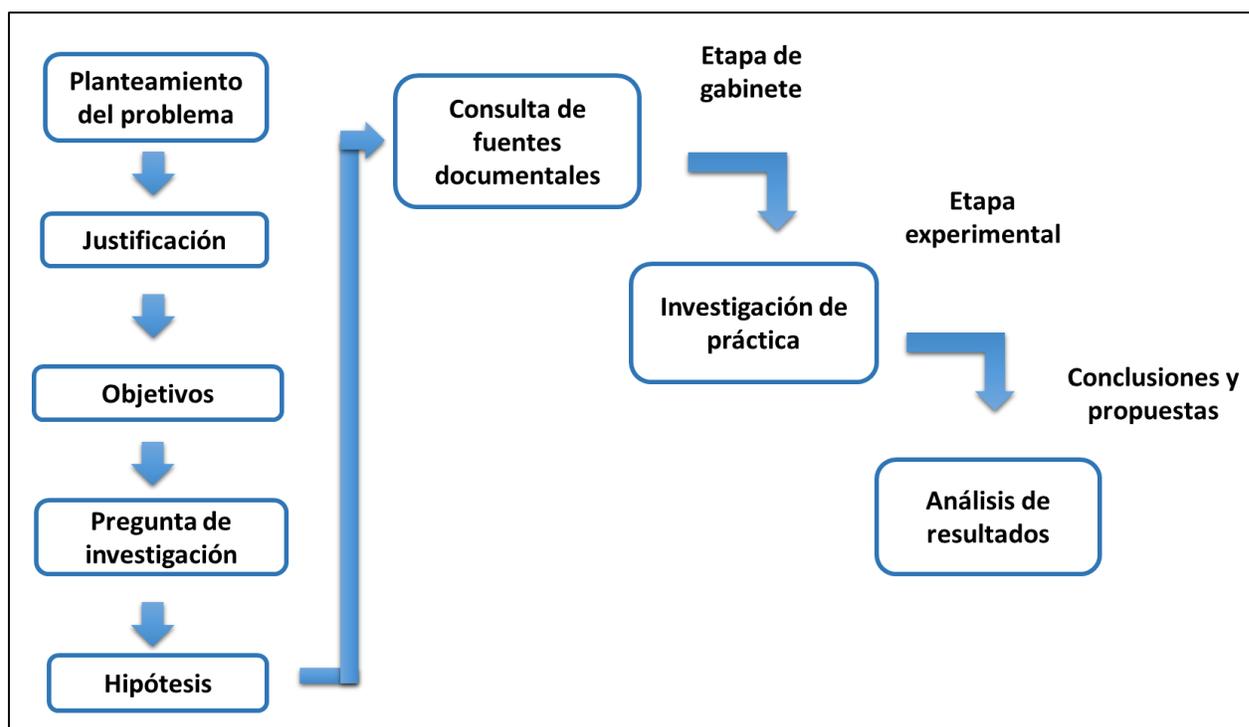
Finalmente, es importante destacar que actualmente México no cuenta con alguna normatividad específica que se encargue de regular la cantidad de color en los efluentes provenientes de las industrias; principalmente de la industria textil. No obstante, existe una preocupación por eliminar el color de las aguas residuales (Alatorre, 2010).

# **CAPITULO IV**

## **Metodología.**

## 4.1 Planteamiento de la investigación

Este proyecto de tesis se dividió en tres etapas: la primera fue la etapa de investigación documental, la segunda fue la investigación práctica o experimental y la tercera el análisis de resultados (Ver figura 22).



**Figura 22. Etapas del desarrollo del proyecto de investigación**

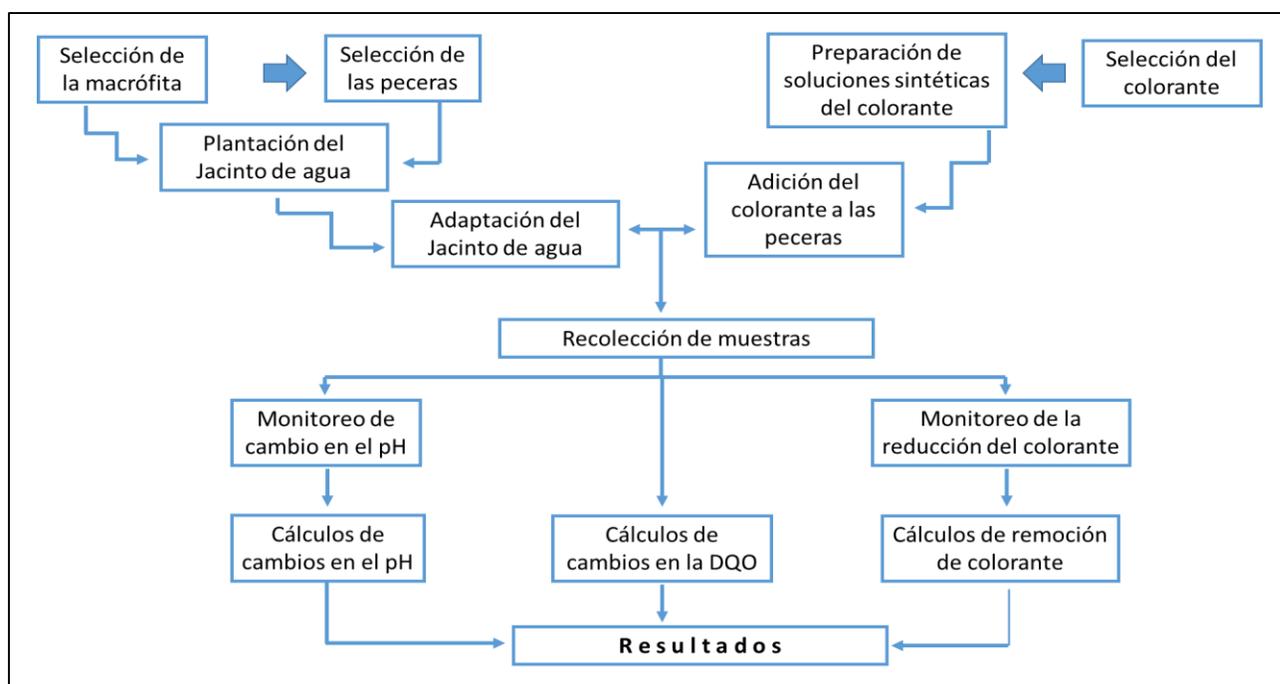
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

Para llevar a cabo la etapa de investigación documental, fue necesario la recopilación y análisis de fuentes documentales relacionadas con los diversos enfoques teóricos y metodológicos considerados para el estudio de fitorremediación. Dicha información estuvo presente en libros, documentos, revistas científicas, leyes, datos estadísticos, documentos oficiales, entre otros; localizados en el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Instituto de Investigación en Ciencias Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional (CICATA-IPN), Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), entre otros. También se consideró la información concentrada en las bibliotecas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), del Instituto Politécnico

Nacional (IPN), la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), por citar algunas.

Incluso fue necesario el acceso a documentos digitales de algunos centros de investigación internacionales, como el Instituto de Ecología (INECOL) en España; o la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de Panamá.

Concluida la etapa de investigación documental, se continuo con la etapa experimental, la cual estuvo conformada por la recolección, cultivo y adaptación de la planta; caracterización de las peceras a diferentes concentraciones; absorción del colorante; obtención y análisis de muestras en laboratorio (Ver figura 23).



**Figura 23. Diagrama de metodología**  
 Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

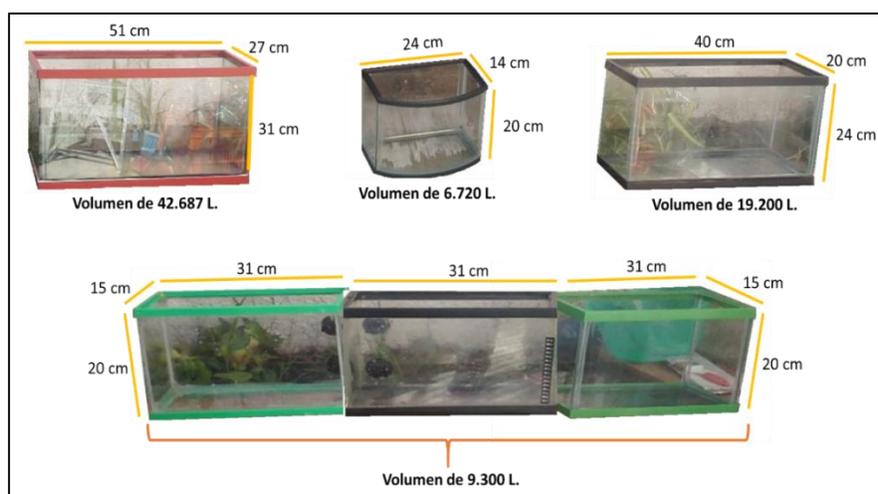
Finalmente, al concluir la etapa experimental se procedió con el análisis de resultados para definir cambios en los niveles de, pH y DQO. Todo lo anterior para establecer la calidad del agua antes y después del tratamiento.

## 4.2. Desglose de actividades

Los pasos que se siguieron en esta investigación fueron los presentados en la figura 23.

4.2.1.- *Selección de la macrófita.* La selección de la especie vegetal fue la correspondiente al Jacinto de agua. Las dimensiones correspondieron a un tamaño regular de aproximadamente 15 cm, en número de 26 elementos, los cuales se repartieron en peceras.

4.2.2. *Selección de peceras.* Las peceras seleccionadas para esta investigación tuvieron una profundidad mínima de 20 cm, un área superficial de 336 cm<sup>2</sup> a 1377 cm<sup>2</sup> y capacidad para 6.720 litros mínimos. En la Figura 24 se muestran las 6 peceras que se utilizaron en el experimento. En estas se colocaron las soluciones sintéticas del colorante azul de metileno a diferentes concentraciones.



**Figura 24. Medidas de las peceras que se usaron en el experimento**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

4.2.3. *Preparación de soluciones sintéticas de Azul de Metileno.* Se prepararon soluciones sintéticas del colorante pesando diferentes fracciones de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mg del colorante para transferirlas a las peceras, cuidando el volumen que pudiera contener cada una de las peceras, de tal modo que se tuvieran las concentraciones correspondientes, que se desglosan en el punto.

4.2.4. *Preparación del diseño de los experimentos.* Las peceras, se lavaron con agua y jabón neutro, se desinfectaron con alcohol y se enjuagaron con agua destilada y HNO<sub>3</sub> (ácido nítrico). Concluido el proceso de preparación de peceras, el siguiente paso fue la plantación del Jacinto de agua en las mismas, para ello se tomó el siguiente parámetro “1 lirio acuático por cada 2 litros de agua” (Ver tabla 19).

**Tabla 19. Datos de volumen de agua y lirio acuático**

Número de pecera	Volumen de agua (L)	Cantidad de lirios acuáticos dentro de la pecera
1	4	2
2	6	3
3	6	3
4	6	3
5	12	6
6	18	9

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Una vez que se colocaron los Jancitos de agua dentro de las peceras (aún sin colorante), prosiguió la adaptación de los mismos en su nuevo hábitat, se dejaron en un lugar cerrado durante 10 días a un pH de 6 a 7 unidades y una temperatura media de 16°C (Figura 25).



**Figura 25. Peceras con Jacinto de agua.**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

4.2.5. *Obtención de soluciones sintéticas del colorante en las peceras.* Posterior al periodo de tiempo que las macrófitas se adaptaron a su nuevo hábitat, se agregaron las fracciones de colorante. Las concentraciones calculadas de colorante fueron de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 partes por millón (ppm ó mL<sup>-1</sup>). Debido a que el volumen de las peceras no concordaba con el volumen de las soluciones, se realizó un ajuste en el cual se multiplicaron las concentraciones (ppm de colorante) por el volumen de agua de cada pecera, con la finalidad de obtener las soluciones sintéticas del colorante. De esta manera las soluciones para cada pecera quedaron tal y como se muestran en la tabla 20 y en la Figura 26.

**Tabla 20. Solución de colorante para cada pecera**

No. de pecera	Cantidad de colorante (gr)	Volumen de agua (L)	Concentración de colorante (ppm)
1	0.12	4	30
2	0.24	6	40
3	0.3	6	50
4	0.36	6	60
5	0.24	12	20
6	0.18	18	10

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016



**Figura 26. Concentración de colorante para cada pecera.**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

### 4.3. Recolección de Muestras

4.3.1. *Muestras iniciales.* Al agregarse las porciones del colorante se tomaron las primeras muestras de agua en una porción de 20 mL (es decir aquellas que aún no tenían tratamiento), en frascos de vidrio previamente etiquetados (Ver figuras 27, 28 y 29).



**Figura 27. Adición del colorante a las peceras**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016



**Figura 28. Frascos de vidrio (20 mL) y jeringas desechables que se utilizaron para tomar las muestras de agua**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016



**Figura 29. Primeras muestras obtenidas**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

A continuación, se muestra el día que se recolectaron las siguientes muestras de agua:

**Tabla 21. Recolección de muestras a 10 ppm**

No. de pecera	Concentración (ppm)	Número de muestra	Tiempo (No. de días)
6	10	1	0
6	10	2	1
6	10	3	3
6	10	4	5
6	10	5	7
6	10	6	9
6	10	7	12
6	10	8	15
6	10	9	18
6	10	10	20
6	10	12	29
6	10	13	32

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

**Tabla 22. Recolección de muestras a 20 ppm**

No. de pecera	Concentración (ppm)	Número de muestra	Tiempo (No. de días)
5	20	1	0
5	20	2	1
5	20	3	3
5	20	4	5
5	20	5	7
5	20	6	9
5	20	7	12
5	20	8	15
5	20	9	18
5	20	10	20
5	20	11	26
5	20	12	29
5	20	13	32

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

**Tabla 23. Recolección de muestras a 30 ppm**

No. de pecera	Concentración (ppm)	Número de muestra	Tiempo (No. de días)
1	30	1	0
1	30	2	1
1	30	3	3
1	30	4	5
1	30	5	7
1	30	6	9
1	30	7	12
1	30	8	15
1	30	9	18
1	30	10	20
1	30	11	26
1	30	12	29
1	30	13	32

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

**Tabla 24. Recolección de muestras a 40 ppm**

No. de pecera	Concentración (ppm)	Número de muestra	Tiempo (No. de días)
2	40	1	0
2	40	2	1
2	40	3	3
2	40	4	5
2	40	5	7
2	40	6	9
2	40	7	12
2	40	8	15
2	40	9	18
2	40	10	20
2	40	11	26
2	40	12	29
2	40	13	32

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

**Tabla 25. Recolección de muestras a 50 ppm**

<b>No. de pecera</b>	<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Número de muestra</b>	<b>Tiempo (No. de días)</b>
3	50	1	0
3	50	2	1
3	50	3	3
3	50	4	5
3	50	5	7
3	50	6	9
3	50	7	12
3	50	8	15
3	50	9	18
3	50	10	20
3	50	11	26
3	50	12	29
3	50	13	32

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

**Tabla 26. Recolección de muestras a 60 ppm**

<b>No. de pecera</b>	<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Número de muestra</b>	<b>Tiempo (No. de días)</b>
4	60	1	0
4	60	2	1
4	60	3	3
4	60	4	5
4	60	5	7
4	60	6	9
4	60	7	12
4	60	8	15
4	60	9	18
4	60	10	20
4	60	11	26
4	60	12	29
4	60	13	32

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

4.3.2. *Monitoreo de variables.* A la vez que se recolectaban las muestras, se procedió a realizar las determinaciones de variables de pH, DQO y Disminución de Colorante.

4.3.2.1- *Determinación de pH.* A cada una de las muestras se les determino el valor de pH mediante el uso de un medidor de pH digital (Ver figura 30). Esto con la finalidad de detectar alguna variación de la concentración de protones en el agua, durante el proceso de absorción del colorante por parte de la planta.



**Figura 30. Medidor de pH digital que se utilizó durante el experimento**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

4.3.3. *Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).* Las cuantificaciones de esta variable se llevaron a cabo, siguiendo la metodología que se señala en la norma oficial mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001, “Análisis de agua - Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba”.

4.3.4. *Disminución de Colorante.* De las muestras obtenidas se realizaron barridos de 200 a 900 nm mediante la técnica espectrofotométrica de un equipo de Ultravioleta (UV) Lambda Perkin Elmer que se observa en la Figura 31, esto se logra colocando en una de cuarzo, 5 mL de la solución muestra, posteriormente se hace funcionar el equipo y este mismo genera los valores de absorbancia de cada una de las muestras. Con estas absorbancias se determinó la concentración del colorante removido.



**Figura 31. Espectrofotómetro de UV**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

# **CAPITULO V**

## **Resultados.**

## **5.1 Comportamiento físico de la planta durante la fase de adaptación y adición del colorante.**

El experimento se realizó durante el invierno en el municipio de Toluca, debido a que el Jacinto de agua es un lirio originario de climas templados las bajas temperaturas se convirtieron en un factor negativo para su sobrevivencia. Por lo tanto, el experimento tuvo que llevarse a cabo en un área cerrada con la finalidad de proteger al lirio del frío, el aire, la lluvia, la contaminación y algunos animales que pudieran haber alterado los resultados finales.

Durante la etapa de adaptación la macrófita no presentó ninguna anomalía como necrosis, deshidratación extrema o delgadez en los tallos, al contrario, se caracterizó por tener buena pigmentación e hidratación; no obstante, a dos días de que concluyera esta fase algunas plantas cambiaron de color verde a amarillo en las orillas de las hojas y en la parte superior de los peciolo (proceso llamado clorosis), a causa de la baja temperatura en el ambiente.

Al concluir la fase de adaptación el siguiente paso fue la adición del colorante; durante los primeros días no hubo ningún cambio significativo, sin embargo, para el día 7 del experimento la mayoría de los lirios comenzaron a sufrir diferentes cambios físicos; por ejemplo, en las peceras con las concentraciones más bajas (10, 20 y 30 ppm) los peciolo aumentaron su tamaño y se intensificó el color verde en las hojas. A comparación de las peceras con mayor concentración de colorante (40, 50 y 60 ppm), los Jacintos de agua perdieron intensidad en el color, incluso algunos se tornaron de color amarillo, además los peciolo disminuyeron su tamaño y en otros la epidermis se desintegro dejando ver su interior de color blanco.

A pesar de las diferencias en los cambios físicos, la única característica que compartieron todas las plantas fue el cambio de color negro a color azul rey en sus raíces. Esto se puede apreciar en las figuras 32, 33 y 34 que corresponden a los días 1, 2 y 7 del experimento.



**Figura 32. Apariencia física del Jacinto de Agua, Día 1**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016



**Figura 33. Apariencia física del Jacinto de Agua, Día 2**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016



**Figura 34. Apariencia física del Jacinto de Agua, Día 3**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Para el día 12 del experimento todos los lirios perdieron intensidad en su color, es decir pasaron de verde esmeralda a verde limón; incluso en cada una de las peceras ya existía al menos una planta con síntomas de necrosis en las hojas y peciolo; pero lo más importante es que la mayoría de las plantas perdieron fuerza en los peciolo que sostenían las hojas, lo que apresuro el proceso de descomposición en las mismas debido al contacto directo con el agua contaminada (Ver figura 35).



**Figura 35. Apariencia física del Jacinto de Agua, Día 12**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Al final del experimento los Jacintos de agua ubicados en las peceras con las concentraciones más altas presentaron amarillamiento y pérdida de la epidermis en las hojas o peciolo; además cerca de un 20% de lirios mostraron síntomas de necrosis y un 35% ya tenía un proceso avanzado de desintegración, ya que en el fondo de las peceras se encontraron restos de hojas y raíces. En cuanto a las peceras con baja concentración de colorante, solamente algunas de las plantas estaban iniciando el proceso de clorosis y algunas otras el de necrosis; sin embargo, la estructura todavía estaba fuerte e hidratada (Ver figura 36).



**Figura 36. Apariencia física del Jacinto de Agua, Día 29**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Tal y como se observó en las Figuras 32, 33, 34, 35 y 36 los Jacintos de agua son macrófitas con anatomía susceptible a sufrir necrosis o amarillamiento debido a las condiciones de temperatura y características del agua; pero una vez adaptada a su ambiente son capaces de sobrevivir y continuar purificando el agua.

## 5.2 Resultados de pH.

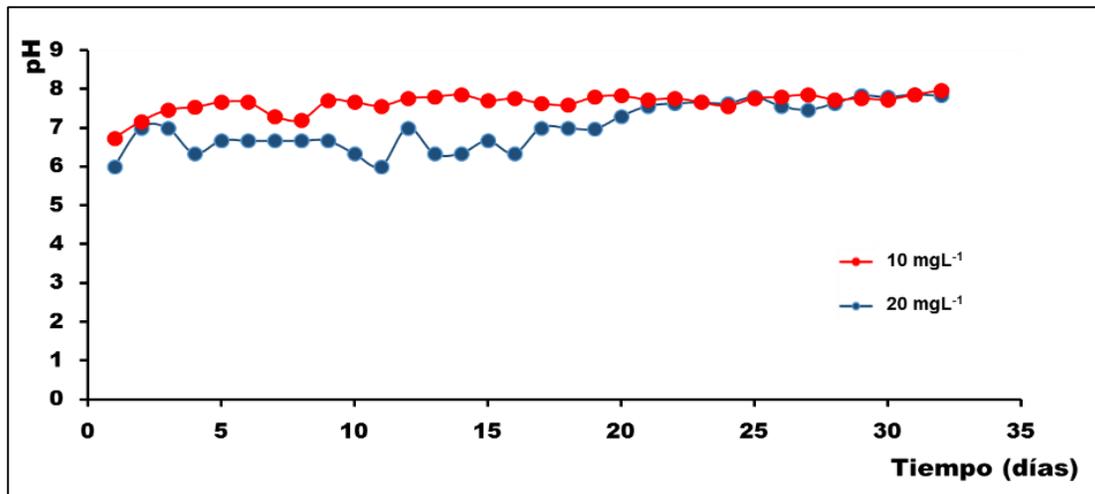
El objetivo de estudiar el comportamiento del pH durante el experimento fue para monitorear la variación de sus valores, con esto dilucidar la reacción química que se generó en fase acuosa con el colorante, y explicar cómo afecta la calidad del agua.

Lo que se observó durante el tratamiento del agua, fue que al estar presente el colorante en el agua, el valor de pH cambió de un valor neutro (7.0 unidades) a uno ácido (5.9 unidades). No obstante, conforme las macrófitas depuraron el agua la acidez disminuyó pasando a la alcalinidad en todas las peceras, la propuesta que justifica dicho cambio se desarrolla en varios pasos:

- La molécula del agua se disocia en protones ( $H^+$ ) e iones hidróxido ( $OH^-$ )
- La interacción de dos electrones libres provenientes de la estructura química del azul de metileno azufre (S) y nitrógeno (N) con los protones disueltos en fase acuosa.
- El aumento de iones hidroxilos ( $OH^-$ ) y por ende la alcalinidad del agua.

A continuación, se muestran los resultados del monitoreo de pH a través de graficas clasificadas por concentración de colorante.

En las peceras con baja concentración de colorante ( $10$  y  $20\text{ mgL}^{-1}$ ) el rango promedio de cambio durante los primeros 16 días fue de 1.0 unidad; después, entre el día 17 y el 22 el pH no cambió más de 0.3 unidades y del día 21 al 32 las dos peceras registraron valores mínimos de 7.63 y máximos de 7.97 unidades; es decir al final del experimento el agua se volvió alcalina (Ver figura 37).



**Figura 37. Valores de pH de las soluciones de 10 y 20 mgL<sup>-1</sup>.**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

En las peceras con 30 y 40 mgL<sup>-1</sup> el rango promedio de cambio fue de 2 unidades; sin embargo, estos no fueron uniformes respecto al tiempo en el que se presentaron, pero al final del experimento ambas peceras registraron valores alcalinos cercanos a 8.

Respecto a la pecera de 30 ppm el valor de pH se mantuvo entre 6.00 y 6.67 unidades hasta el día 18, posteriormente del día 19 al día 22 se observó una tendencia alcalina del agua; y al final del día 23 al 32 el agua mantuvo valores alcalinos de 7.77 a 7.93 (Ver figura 38).

En relación a la pecera de 40 ppm el pH cambio constantemente de 6.33 a 7.67 unidades los primeros 17 días del experimento, y después del día 18 al día 32 se mantuvo en escala alcalina registrando valores mínimos de 7.90 y máximos de 8.27 (Ver figura 38).

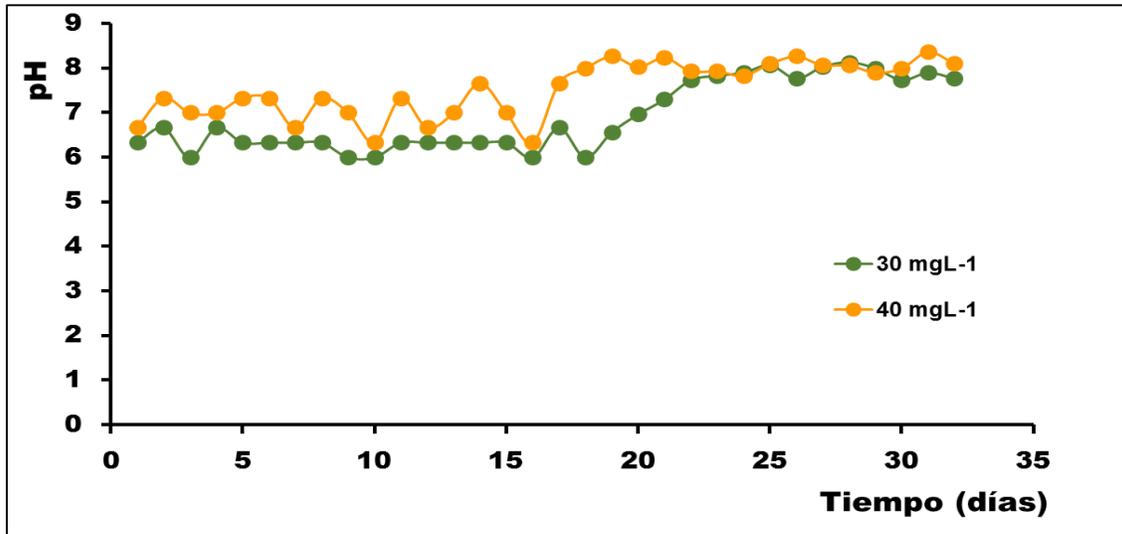


Figura 38. Valores de pH de las soluciones de 30 y 40 mgL<sup>-1</sup>.  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Por último, en las peceras con las concentraciones de 50 ppm y 60 ppm las variaciones en el pH fueron similares; es decir, del día 1 al día 19 las dos cambiaron constantemente de 7.00 a 8.00; posteriormente del día 20 al día 28 el rango promedio de cambio fue de 0.2 a 0.4 unidades. Al final el agua de las dos peceras también se volvió alcalina ya que los últimos 5 valores registrados fueron de 7.7 (Ver figura 39).

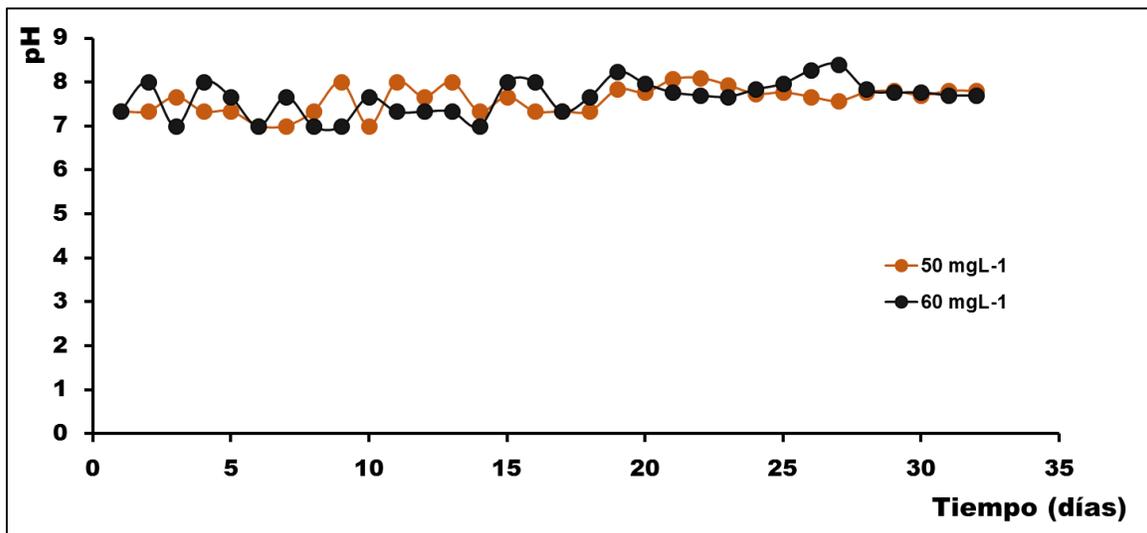
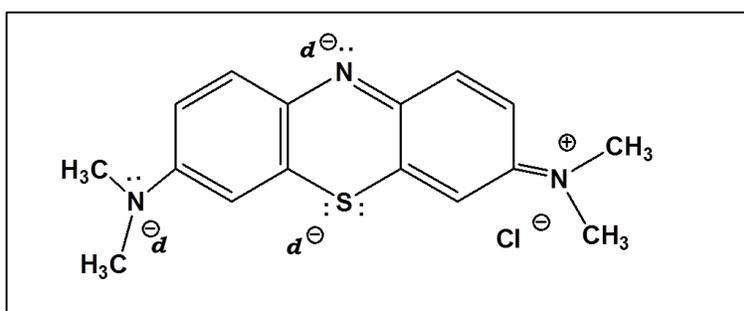


Figura 39. Valores de pH de las soluciones de 50 y 60 mgL<sup>-1</sup>.  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

En conclusión, se establece que todas las peceras sufrieron cambios significativos de pH durante los primeros 17 días llegando a presentar variaciones de una a dos unidades; después del día 18 al 24 se observó una disminución en las variaciones (menores a 0.9 unidades); y finalmente del día 25 al día 32 el pH de todas las peceras mantuvo valores alcalinos entre 7.7 y 8.3.

### 5.3 Mecanismo de interacción del Azul de Metileno con la fase acuosa.

Para explicar el comportamiento de las oscilaciones de los valores de pH se generó un mecanismo que justifica la interacción que se presentó entre las moléculas del colorante azul de metileno y la molécula del agua. En la Figura 40 la fórmula química del colorante. En dicha estructura se puede apreciar que tiene átomos de nitrógeno y azufre, que por naturaleza tienen pares de electrones libres, los cuales desempeñan un papel fundamental en dicho mecanismo.

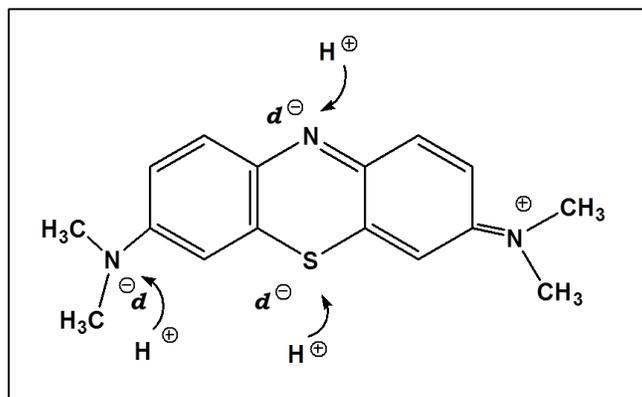


**Figura 40. Dipolos formados en el colorante Azul de Metileno**  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Como se aprecia en la Figura 40 el azufre tiene dos pares de electrones libres, debido a la configuración electrónica de su último nivel, asimismo el nitrógeno tiene solo un par de electrones libres. Estos electrones le confieren a dichos elementos una carga negativa, que usualmente se le llama dipolo ( $\delta^-$ ). En el medio acuoso se lleva a cabo la disociación del agua, la reacción característica se presenta a continuación:



Dicha disociación se genera protones ( $H^+$ ) e iones hidroxilo ( $OH^-$ ), posteriormente los protones son atraídos por diferencia de cargas por la molécula del colorante mediante sus dipolos negativos, esto se muestra en la Figura 41.



**Figura 41. Interacción entre el colorante Azul de Metileno y los protones del agua**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Esta atracción de protones generó un desequilibrio en la concentración libre de estos iones, por lo cual en el medio acuoso empiezan a predominar los iones hidroxilo. Por lo cual el valor del pH empieza a incrementarse para situarse en el rango de alcalino. Esto explica el comportamiento de las figuras 37, 38, 39 donde se mostró que conforme al aumento el tiempo de tratamiento los valores de pH tendieron a ser básicos.

#### 5.4 Resultados de la remoción del colorante Azul de Metileno

El total de muestras analizadas durante el experimento fue de 78, es decir, 13 por pecera durante 32 días, cabe hacer notar que en todas las muestras la degradación del color pudo ser visible a simple vista. A continuación, se describen las imágenes de las muestras más representativas de cada pecera.

Para el caso de 10 ppm el cambio de color fue drástico, pues al final del experimento las muestras de agua fueron casi transparentes. En la concentración de 20 ppm la disminución del color más significativa se observó desde el día 9 del experimento, pero después del día 18 el cambio de color fue mínimo (ver figuras 42 y 43).



**Figura 42. Total de muestras a 10 ppm**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016



**Figura 43. Total de muestras a 20 ppm**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

En las figuras 44 y 45 se exponen las muestras de las peceras con 30 y 40 ppm respectivamente. En la primera se observa una degradación considerable de color durante los 32 días del experimento; a comparación de la pecera con 40 mgL<sup>-1</sup> donde el cambio de color aparenta ser en dos periodos, el primero del día 1 al 12 (muestras de color azul marino) y el segundo del día 15 al 32 (muestras de color azul turquesa).



**Figura 44. Total de muestras a 30 ppm**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016



**Figura 45. Total de muestras a 40 ppm**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Finalmente, se presentan las muestras de las peceras con 50 y 60 ppm en las figuras 46 y 47; en ambas la disminución de color parece desarrollarse en tres etapas, la primera del día 1 al 9 (muestras color azul marino), la segunda del día 12 al 20 (muestras de color azul celeste) y la tercera del día 26 al 32 (muestras de color azul turquesa).



**Figura 46. Total de muestras a 50 ppm**

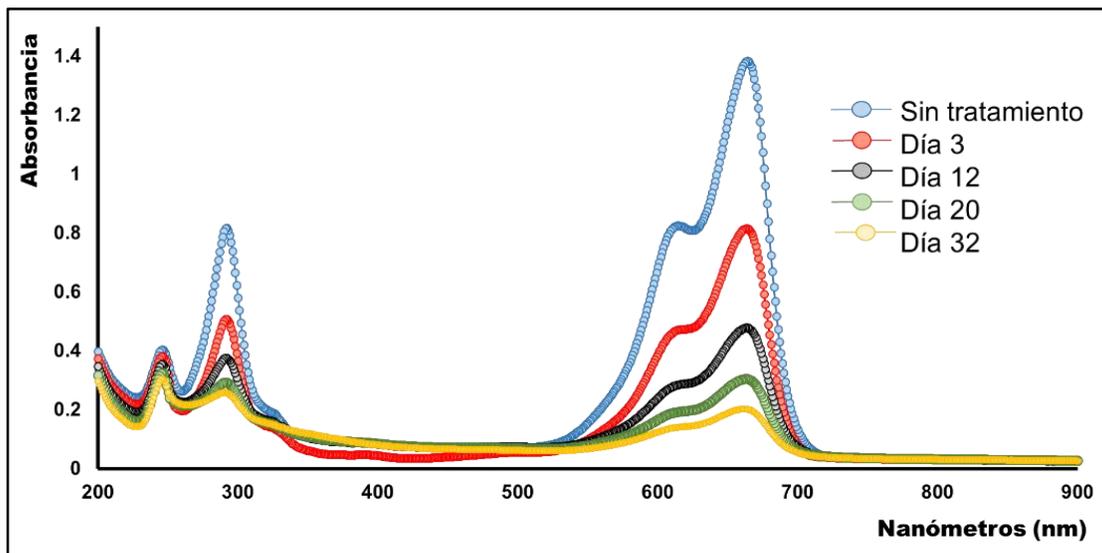


**Figura 47. Total de muestras a 60 ppm**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

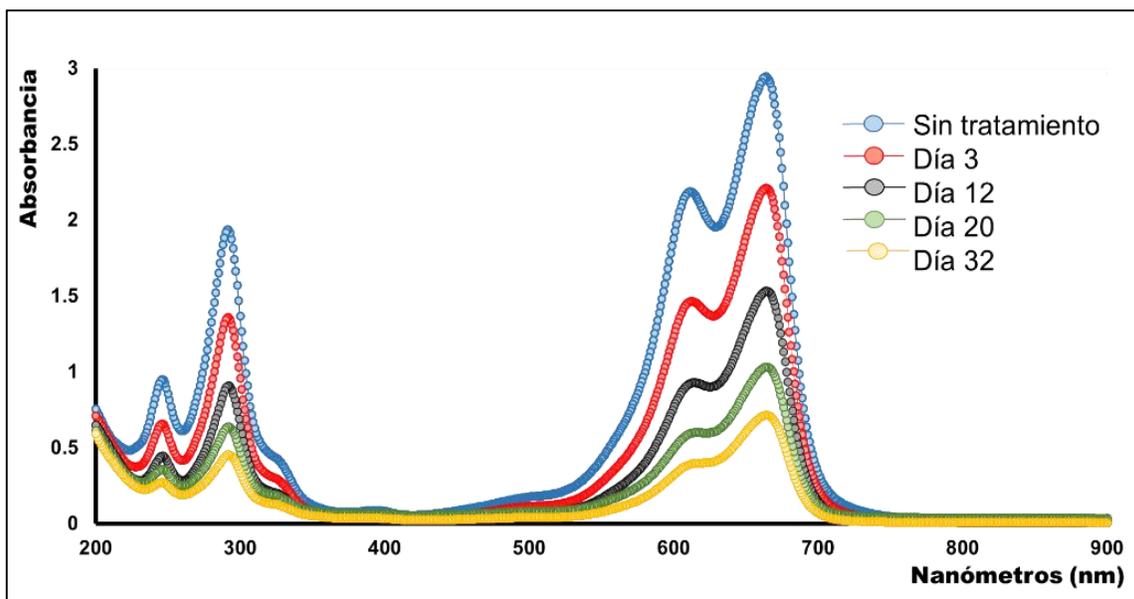
Cabe hacer notar que, al concluir el experimento las muestras de agua fueron sometidas a un análisis de espectrofotometría ultravioleta-visible, con el objetivo de corroborar la disminución del color en cada una de las peceras. El resultado reveló que la concentración de colorante decreció en función del número de días de tratamiento. Para el caso de la pecera con  $10 \text{ mgL}^{-1}$  de colorante, el espectrofotómetro UV detecto un valor inicial de 0.81 unidades a una longitud de onda de 300 nm., pero conforme evolucionó el tratamiento los valores disminuyeron a 0.25; al final el total de colorante removido del agua fue de 94.98% (ver figura 48).



**Figura 48. Nivel de absorbancia a  $10 \text{ mgL}^{-1}$**

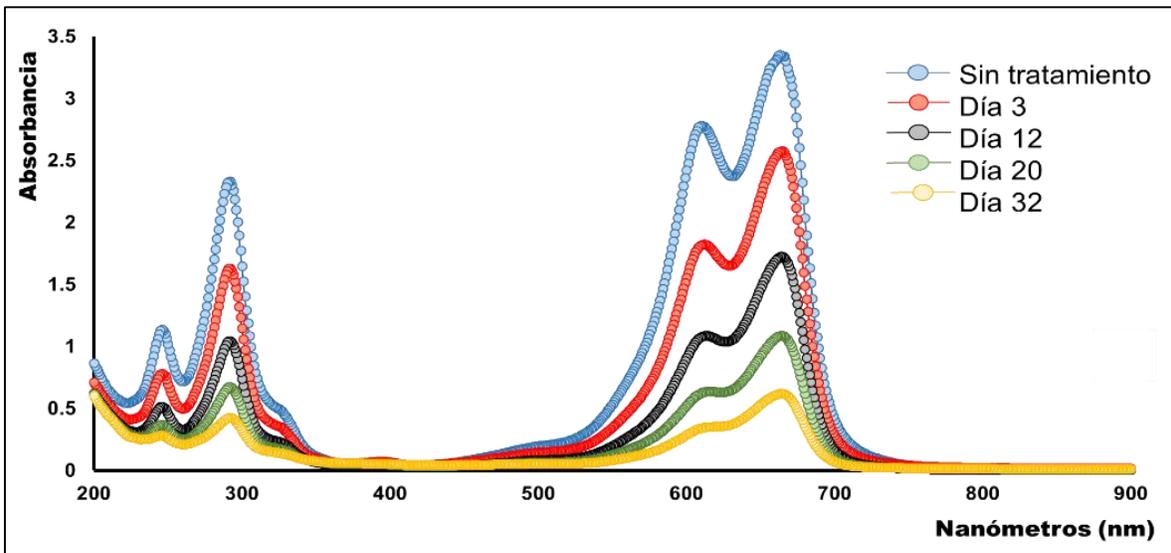
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

En la pecera con  $20 \text{ mgL}^{-1}$  la absorbancia de la muestra sin tratamiento fue de 1.92 a una longitud de onda de 300 nm; 12 días después el valor descendió a 0.90 y luego a 0.44 el día 32; en este caso el lirio absorbió 0.82% de colorante (Ver figura 49).



**Figura 49. Nivel de absorbancia a  $20 \text{ mgL}^{-1}$**   
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Respecto a la gráfica 50 de la pecera con  $30 \text{ mgL}^{-1}$  los valores demostraron que el nivel de absorbancia aumento a comparación de las primeras dos peceras; a causa de la rápida saturación de colorante en el lirio en un periodo de tiempo muy corto. Sin embargo, el nivel de absorbancia fue aceptable, ya que el valor registrado fue de 89.88%.

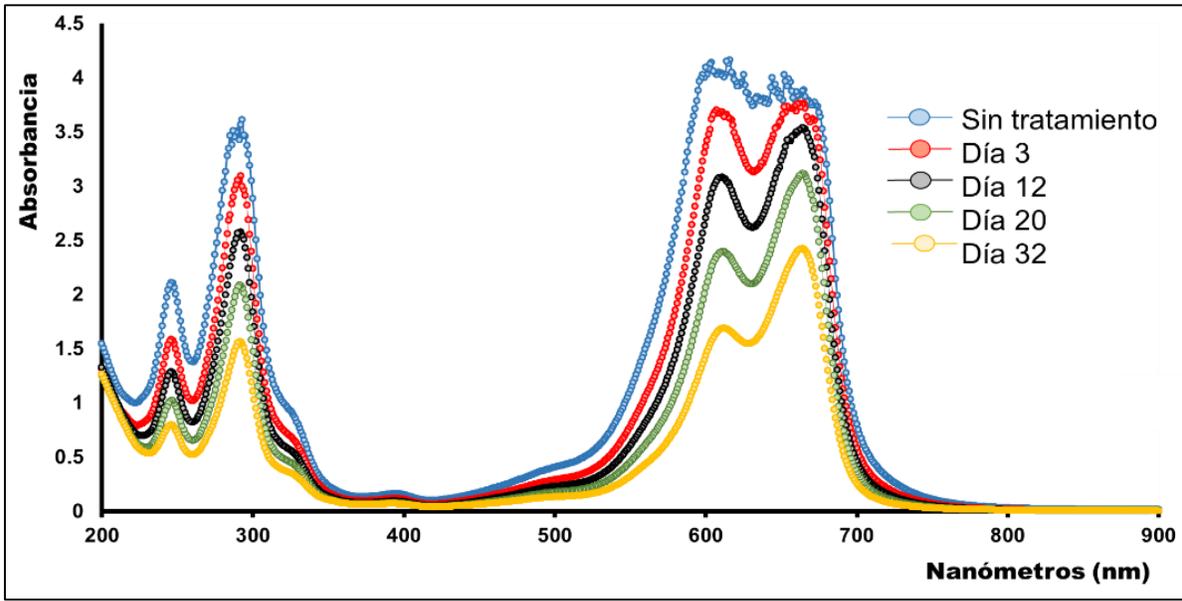


**Figura 50. Nivel de absorbancia a 30 mgL<sup>-1</sup>.**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

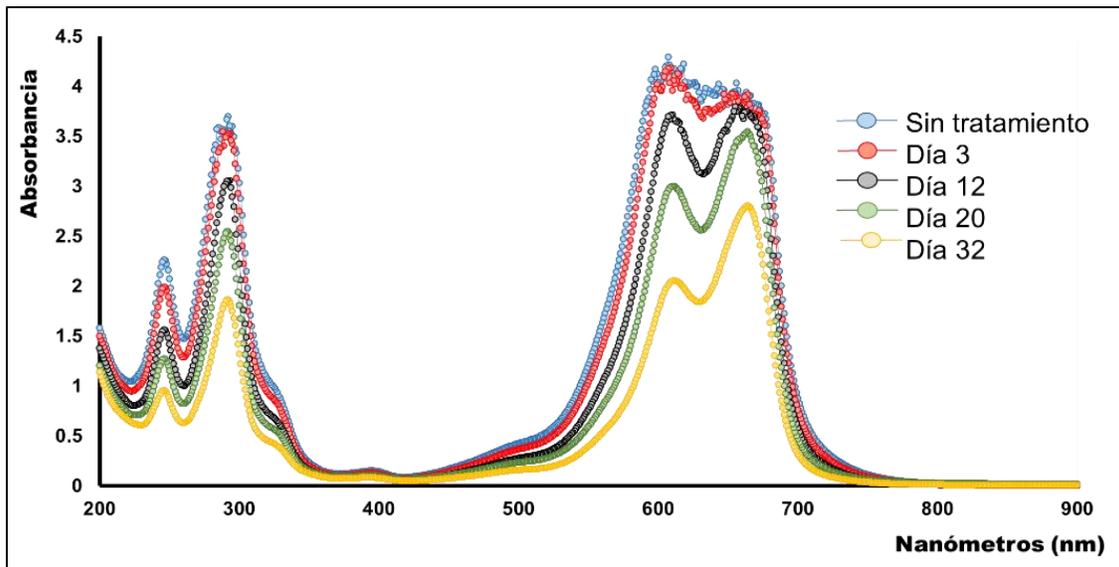
Específicamente para explicar la absorbancia registrada en las siguientes concentraciones (40, 50 y 60 ppm), es importante resaltar que a partir de la longitud de onda 590 a la 680, las gráficas mostraron una variación de datos en sus picos; a causa del ruido producido en el equipo por las limitaciones de la ley de Beer-Lambert.

Particularmente en la pecera con 40 mgL<sup>-1</sup> el valor de la muestra inicial fue de 3.6 que se redujo a 1.5 al término del experimento; pero al final el tratamiento en esta pecera no fue representativo, porque el porcentaje de remoción de colorante fue de 50.68 (ver figura 51).



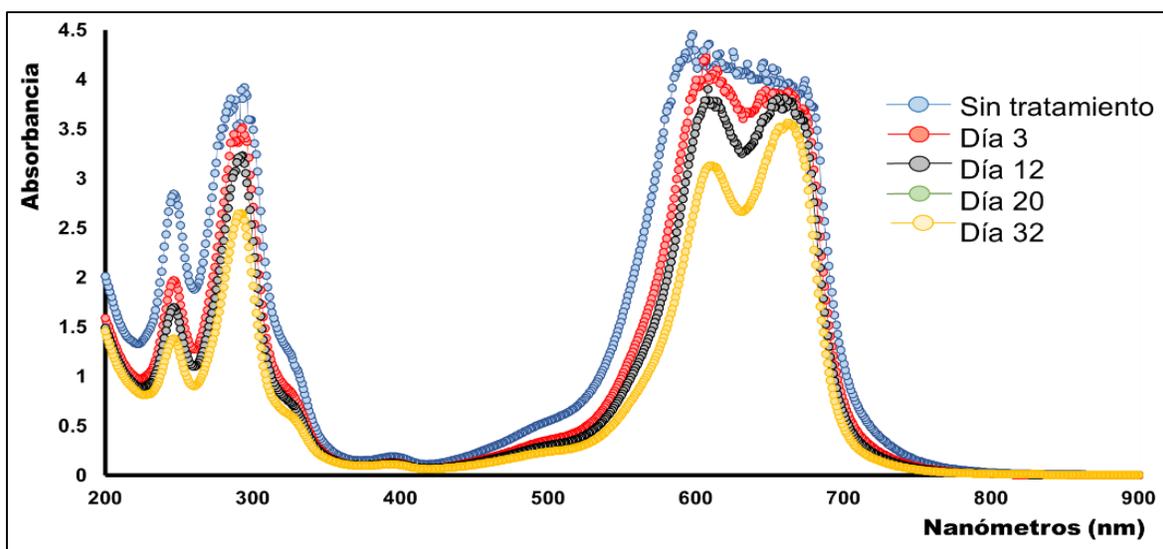
**Figura 51. Nivel de absorbancia a 40 mgL<sup>-1</sup>**  
 Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

En cuanto a la pecera con 50 mgL<sup>-1</sup> el valor inicial medido por el espectrómetro fue de 3.7 y decreció a 1.80; es decir el lirio de esta pecera se saturó de colorante en tan poco tiempo que no logro remover más que el 51.77% del colorante(ver figura 52).



**Figura 52. Nivel de absorbancia a 50 mgL<sup>-1</sup>**  
 Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Respecto a la pecera con  $60 \text{ mgL}^{-1}$  el ruido se presentó a mayor escala en la muestra inicial, pero en general las unidades de absorbancia disminuyeron poco más de una unidad durante el tratamiento; aunque el estudio en esta pecera demostró que la cantidad de colorante removida fue la más baja con 40.44% (ver figura 53).



**Figura 53. Nivel de absorbancia a  $60 \text{ mgL}^{-1}$**   
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

### 5.5 Resultado de los valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Como se mencionó en la metodología para corroborar la disminución del colorante en función del tiempo de tratamiento se realizaron las pruebas de demanda química de oxígeno de cada una de las muestras recolectadas del tratamiento.

A continuación, se presentan las gráficas generadas para análisis de muestras. Para el caso de las peceras con concentraciones de  $1020$  y  $30 \text{ mgL}^{-1}$ , que se muestran en las Figuras 54, 55 y 56.

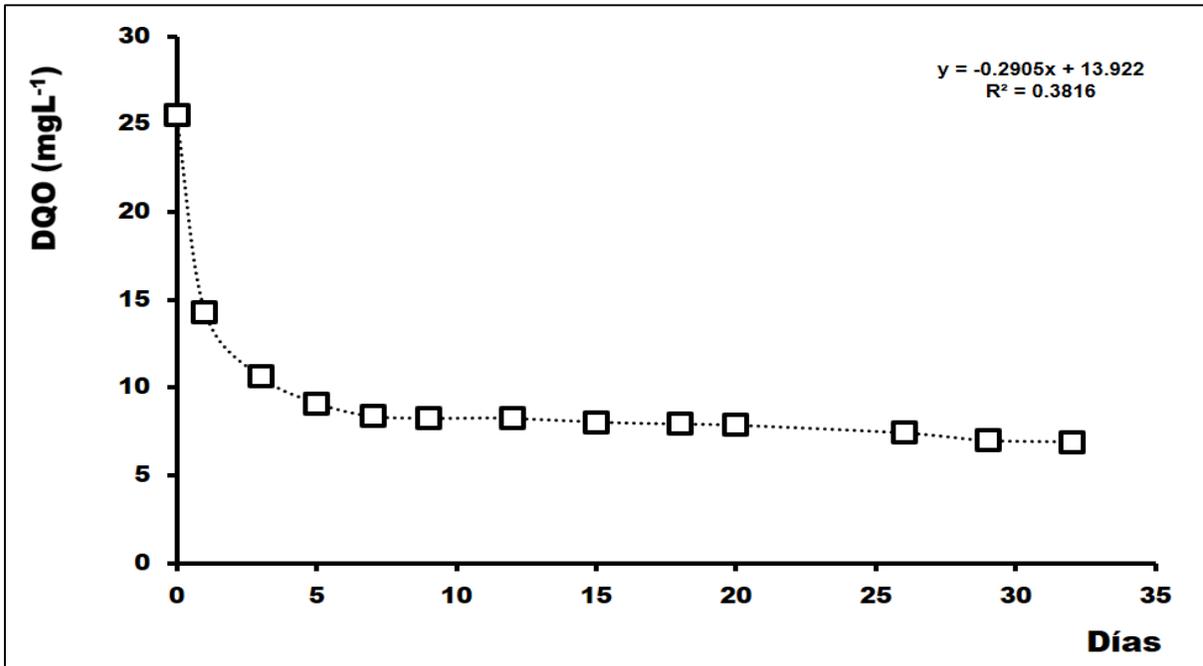


Figura 54. Valores DQO para la solución de 10 mgL<sup>-1</sup>  
 Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

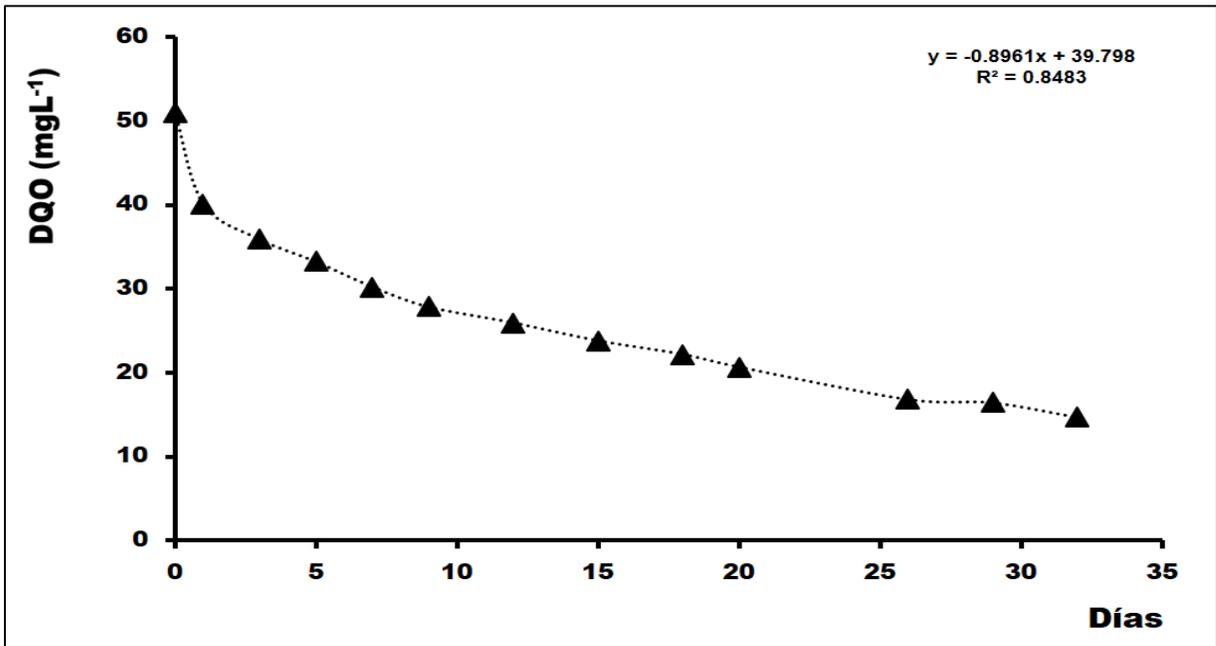
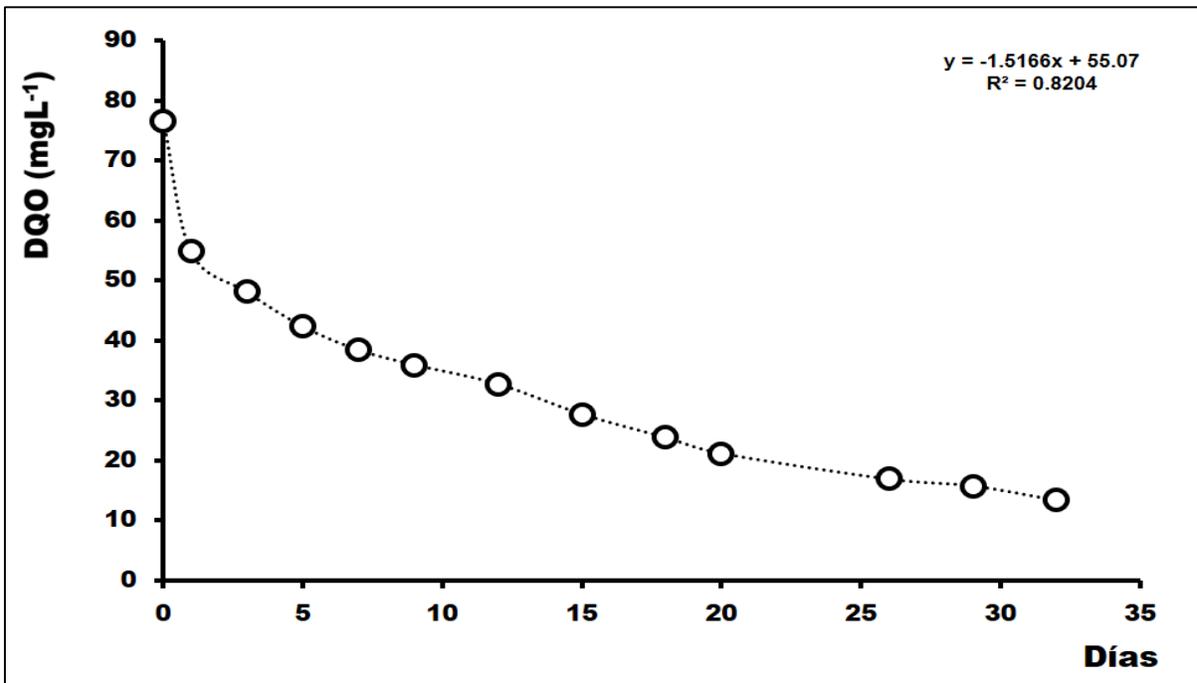


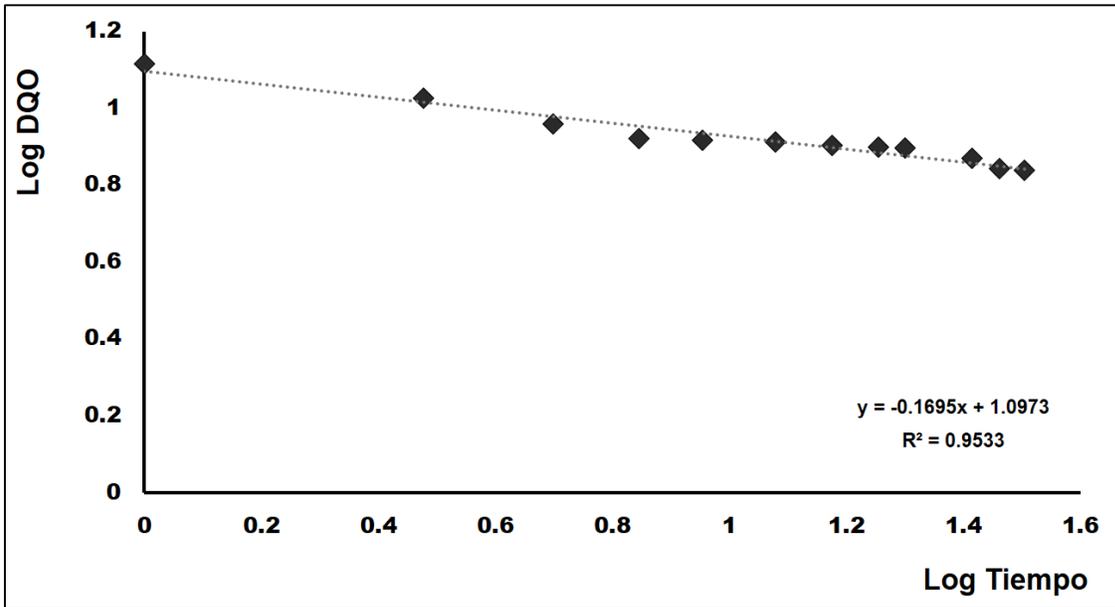
Figura 55. Valores DQO para la solución de 20 mgL<sup>-1</sup>  
 Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.



**Figura 56. Valores DQO para la solución de 30 mgL<sup>-1</sup>**  
 Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016

Como se puede apreciar en las tres graficas se determinaron los coeficientes de correlación, los cuales fueron relativamente bajos. Por lo que se establece que el proceso de absorción del colorante por la planta no siguió un comportamiento lineal. Con base en la revisión de dichas curvas, se procedió a linealizar los datos, para lo cual se calcularon los logaritmos de las variables de los ejes. De este cálculo se obtuvieron las correspondientes ecuaciones de las rectas, así como su coeficiente de correlación. Esto se muestra en las Figuras 57, 58 y 59.

En la Figura 57 de la concentración de 10 mgL<sup>-1</sup>, se puede apreciar claramente la linealización de los puntos mostrando un comportamiento de una disminución de la presencia del colorante en función del tiempo de tratamiento. Asimismo, se comprobó dicho comportamiento al observar el resultado del coeficiente de correlación que fue de  $r^2 = 0.9555$ , el cual si se contrasta con lo que se señala teóricamente muestra una buena correlación entre las variables que participan en el experimento.



**Figura 57. Valores de DQO para la solución de 10 ppm**  
 Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

Finalmente se determinó el modelo matemático que explica el comportamiento del ensayo experimental, para lo cual se realizó la regresión utilizando las formulas [1] y [2]:

Formula [1]

$$b_2 = \frac{n \sum \log X \log Y - \sum \log X \sum \log Y}{n \sum \log^2 X - (\sum \log X)^2}$$

Formula [2]

$$a_2 = 10^{\left( \frac{\sum \log Y}{n} - b_2 \frac{\sum \log X}{n} \right)}$$

Donde la variable “x” corresponde al logaritmo del tiempo y la variable “y” corresponde al logaritmo de la DQO. Para la serie de datos generados de la solución cuya concentración fue de 10 mgL<sup>-1</sup> los resultados de la aplicación de las formulas [1] y [2] fueron los siguientes:

$$b_2 = \frac{13(10.8534) - (12.1687)(12.5519)}{13(14.5602) - (12.1687)^2} = \frac{-11.6461}{41.20} = -0.2826$$

$$b_2 = -0.2826$$

$$a_2 = 10^{\left( \frac{12.5319}{13} - (-0.2826) \frac{(12.1687)}{13} \right)}$$

$$a_2 = 10^{(0.9639 + 0.2645)}$$

$$a_2 = 10^{1.2284}$$

$$a_2 = 16.92$$

Con los valores de  $b_2$  y  $a_2$  se sustituyeron en la ecuación logarítmica teórica:

$Y = a_2 X^{b_2}$ , con la sustitución la ecuación final que interpreta dicho experimento es:

$$Y = 16.92 X^{-0.2826}$$

Cabe señalar que los datos generados del ensayo y que son necesarios para dichos cálculos se presentan en forma de tabla en la sección de anexos (de igual manera en esta sección se presentan los datos para los tres ensayos de concentración de 10, 20 y 30 mgL<sup>-1</sup>).

Para el caso de la pecera con concentración de 20 mgL<sup>-1</sup> de colorante, la gráfica muestra una continua disminución de colorante, la cual se modifica en función del tiempo de tratamiento. El coeficiente de correlación para esta concentración fue de 0.9547, ver figura 58.

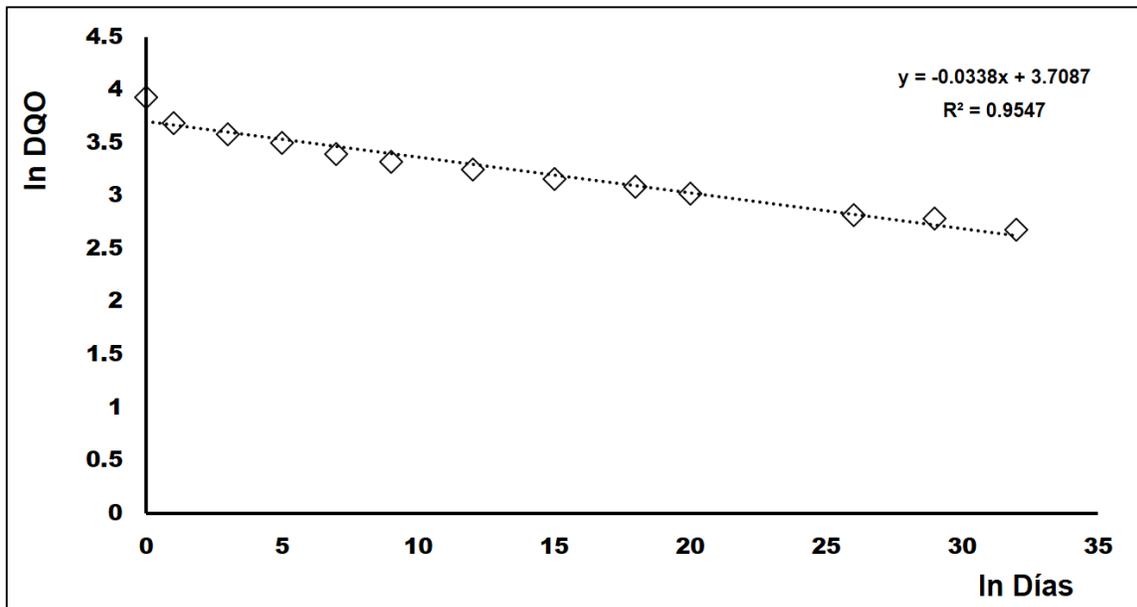


Figura 58. Valores de DQO para la solución de 20 ppm

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

De igual manera Las fórmulas que se utilizaron para realizar el modelo matemático graficado anteriormente fueron las formulas [3] y [4]:

Formula [3]

$$b_1 = \frac{n \sum x \ln Y - \sum x \sum \ln Y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Formula [4]

$$a_1 = e^{\left(\frac{\sum \ln Y}{n}\right) - b_1 \frac{\sum x}{n}}$$

Los resultados obtenidos por la aplicación de las formulas [3] y [4] a una concentración de colorante de 20 mgL<sup>-1</sup> fueron los siguientes:

$$b = \frac{13 (529.2381) - (177)(42.3011)}{13 (3799) - (177)^2} = \frac{-607.1994}{18058} = -0.03362$$

$$b = -0.03362$$

$$a = e^{\left( \frac{42.3011}{13} - (-0.03362) \frac{(177)}{13} \right)}$$

$$a = e^{(3.25 + 0.4577)}$$

$$a = e^{3.7077}$$

$$a = 40.75$$

Una vez obtenidos los valores  $a_1$  y  $b_1$ , se sustituyeron en la ecuación logarítmica teórica  $Y = a_1 e^{b_1 x}$ , la ecuación logarítmica final para el modelo matemático de esta concentración fue la siguiente:

$$Y = 40.75 e^{-0.0336x}$$

A continuación, en la figura 59 se muestra la gráfica resultado del modelo matemático aplicado para la pecera con  $30 \text{ mgL}^{-1}$  de colorante. En dicha grafica se puede observar un descenso en la concentración de colorante, la cual se encuentra relacionada con el tiempo de tratamiento, su coeficiente de correlación fue de 0.967

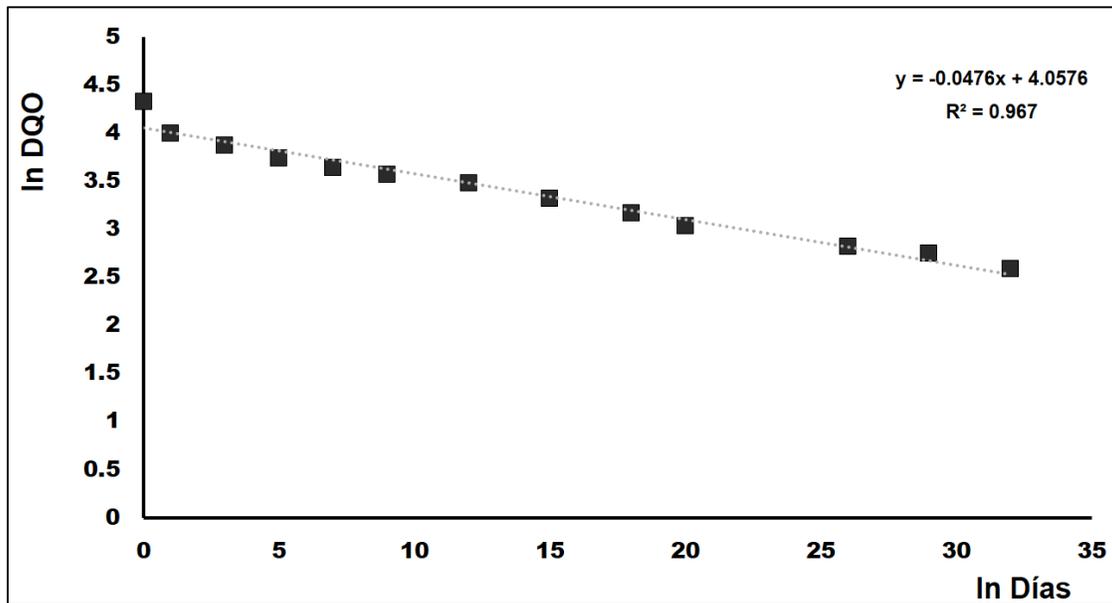


Figura 59. Valores de DQO para la solución de 30 ppm  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

Las fórmulas que se utilizaron para obtener los datos graficados fueron las mismas aplicadas en la concentración de 20 mgL<sup>-1</sup>, es decir las formulas [3] y [4]:

Formula [3]

$$b_1 = \frac{n \sum x \ln Y - \sum x \sum \ln Y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Formula [4]

$$a_1 = e^{\left(\frac{\sum \ln Y}{n}\right) - b_1 \frac{\sum x}{n}}$$

Los resultados obtenidos por la aplicación de estas fórmulas fueron los siguientes:

$$b = \frac{13 (538.300) - (177) (44.3952)}{13 (3799) - (177)^2} = \frac{-860.0504}{18058} = -0.047$$

$$b = -0.047$$

$$a = e^{\left( \frac{44.39}{13} - (-0.047) \frac{(177)}{13} \right)}$$

$$a = e^{(3.41 + 0.6399)}$$

$$a = e^{4.04}$$

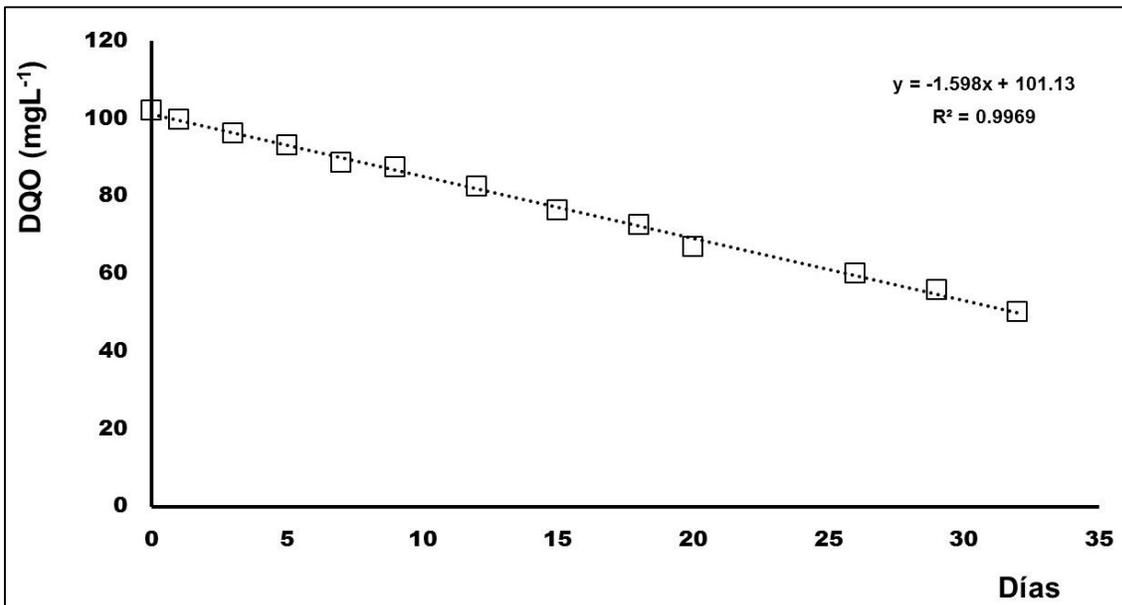
$$a = 56.82$$

Ya obtenidos los valores  $a_1$  y  $b_1$ , se sustituyeron en la ecuación logarítmica teórica  $Y = a_1 e^{b_1 x}$ , quedando la ecuación logarítmica final de la siguiente manera:

$$Y = 56.82 e^{-0.047x}$$

Cabe señalar que, para las peceras con concentraciones de 40, 50 y 60 mgL<sup>-1</sup>, la elaboración de ecuaciones logarítmicas no fue necesario, ya que el comportamiento de la remoción del colorante – tiempo de tratamiento presento un modelo lineal. Esto se determinó mediante los resultados de los coeficientes de correlación como se puede observar en las figuras 60, 61 y 62.

Por ejemplo, en la pecera con 40 ppm la DQO inició en 100 mgL<sup>-1</sup> y decreció paulatinamente hasta llegar a 50 mgL<sup>-1</sup> durante los 32 días del experimento (ver figura xx). Cabe hacer notar que, la disminución gradual de absorción en las peceras con 30 y 40 ppm de colorante, evidencio la pérdida de capacidad de absorción del lirio de forma inmediata, no obstante, se logró disminuir la cantidad de colorante disuelta en la fase acuosa.



**Figura 60. Valores de DQO para la solución de 40 ppm**

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

Finalmente, en las peceras con alta concentración de colorante (50 y 60 ppm) la DQO presentó un cambio significativo durante los primeros 10 días, posteriormente la variación fue poca, debido a que el Jacinto de agua agotó su capacidad de absorción por la elevada concentración de colorante.

En el caso de la pecera con 50 ppm la DQO descendió 20 unidades los primeros 10 días, después se mantuvo entre 94 y 63 mgL<sup>-1</sup>; en total absorbió 64 unidades (ver figura 61).

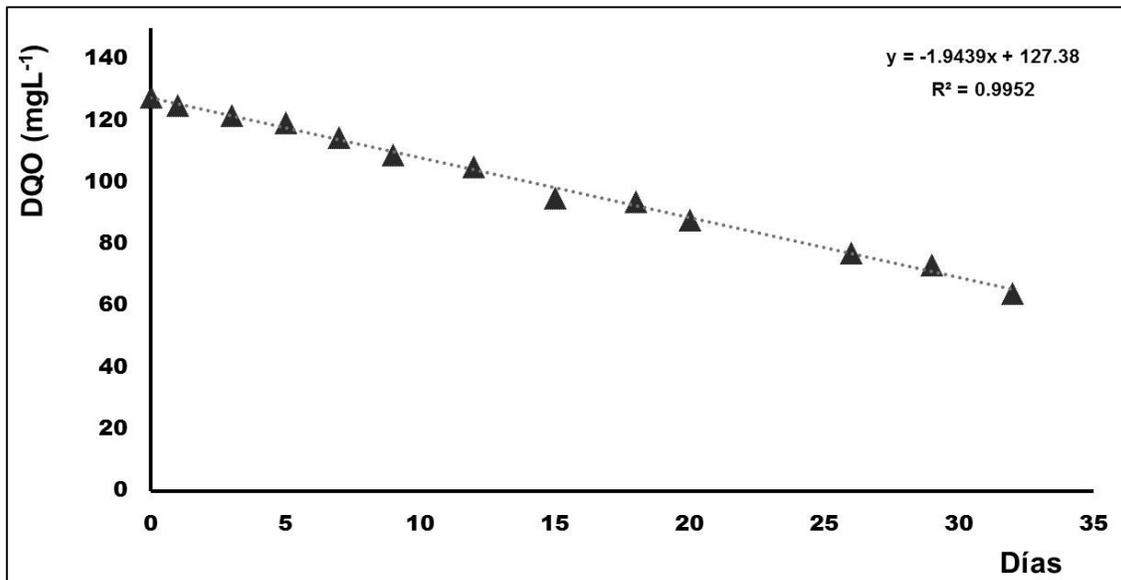


Figura 61. Valores de DQO para la solución de 50 ppm,  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

Para el caso de la pecera con 60 ppm la DQO descendió de 153 a 133 mgL<sup>-1</sup> los primeros 10 días, después se mantuvo entre 130 y 109 mgL<sup>-1</sup>; al final disminuyó 44 unidades durante todo el experimento (ver figura 62).

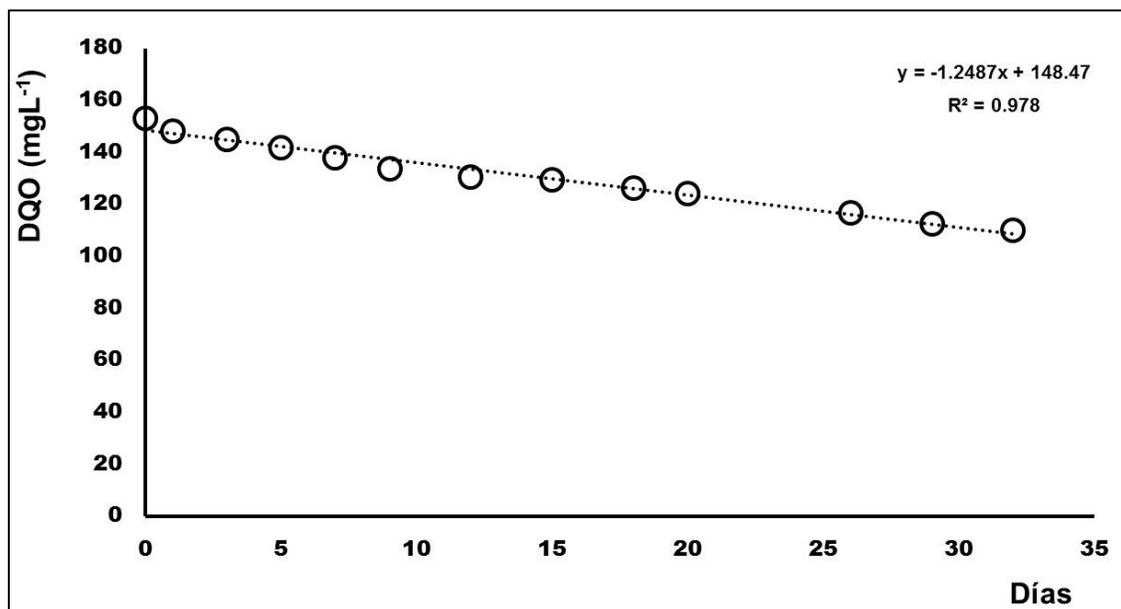


Figura 62. Valores de DQO para la solución de 60 ppm,  
Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

## 5.6 Integración de resultados.

A continuación, en tabla 27 se exponen los días del experimento con los valores más representativos de absorción, D.Q.O. y porcentaje de remoción para cada solución recabados durante la investigación.

**Tabla 27. Resultados del estudio de variables**

Solución (mg/L <sup>-1</sup> )	Tiempo (días)	Absorción	DQO	% de remoción
10	0	0.95	25.51	9.5
	3	0.50809	10.64	58.1071953
	12	0.37634	8.26	77.45374449
	20	0.2935	7.88	89.61820852
	32	0.25696	6.89	94.98384728
20	0	1.5841	51.02	7.9205
	3	1.3597	35.91	16.52716593
	12	0.9101	25.89	49.53744493
	20	0.63969	20.65	69.39133627
	32	0.45557	14.70	82.90969163
30	0	2.452	76.53	8.173333333
	3	1.63052	48.12	31.09544787
	12	1.04807	32.71	59.60499266
	20	0.67595	21.09	77.81938326
	32	0.42953	13.41	89.88105727
40	0	3.1894	102.20	7.9735
	3	3.09316	96.12	-5.37298091
	12	2.57486	82.49	13.65418502
	20	2.08653	66.85	31.58113069
	32	1.56617	50.18	50.6839207
50	0	3.7064	127.55	7.4128
	3	3.52649	121.49	2.707488987
	12	3.0505	104.90	16.95447871
	20	2.54903	87.72	31.68193833
	32	1.86509	63.87	51.76828194
60	0	3.9868	153.06	6.644666667
	3	3.74959	144.95	13.68600098
	12	3.50681	130.62	19.6277533
	20	3.23065	124.03	26.38644151
	32	2.65647	109.96	40.43881547

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

De acuerdo a la tabla anterior, los valores de las concentraciones a 10, 20 y 30 ppm son los que menos saturación de colorante presentaron al inicio del experimento, ya que los datos no rebasaron las 0.50, 1.58 y 2.45 unidades respectivamente; a comparación de las otras tres peceras donde los valores máximos de absorción rebasaron las 3 unidades más de una ocasión.

Respecto a la D.Q.O. se observó que la cantidad de oxígeno disuelto en el agua varió de acuerdo a las concentraciones de color, es decir en las 3 peceras con las concentraciones más bajas el oxígeno promovió la absorción del colorante en el lirio, pero conforme disminuyó el oxígeno el lirio se saturó y no logró absorber más que la mitad de contaminante a 40, 50 y 60 ppm.

En resumen, se dice que el porcentaje de remoción de colorante fue proporcional a la concentración del mismo; pues a mayor concentración menor remoción (menos del 50%) y a menor concentración mayor absorción (más del 80%).

# **Capítulo VI**

## **Conclusiones**

Se establece que tanto el objetivo general como la hipótesis planteados al principio de la investigación se cumplieron parcialmente, pues la *Eichhornia crassipes* removió más del 90% la concentración de color solamente a una concentración de 10 mg/L<sup>-1</sup>.

Los objetivos específicos y las preguntas ubicadas en el planteamiento del problema también se cumplieron, por lo cual de los resultados generados se enlistan las siguientes conclusiones conforme al orden en el que se establecieron los objetivos:

- Al final del experimento los lirios ubicados en las peceras con 10, 20 y 30 mgL<sup>-1</sup> presentaron necrosis y clorosis.
- Los Jacintos de agua ubicados en las peceras con 40, 50 y 60 mgL<sup>-1</sup> manifestaron amarillamiento, necrosis, descomposición y pérdida de la epidermis.
- La disminución de la concentración del colorante se observó a simple vista y se comprobó con los valores de la DQO derivados del análisis de espectrofotometría ultravioleta visible.
- El Jacinto de agua fue capaz de remover más del 85% de colorante en muestras con concentraciones mínimas de 30 mgL<sup>-1</sup>.
- El porcentaje de remoción de colorante fue del 94.98% a 10 mg/L<sup>-1</sup>, 85.5% en 20 y 30 mg/L<sup>-1</sup>, 50% en 40 y 50 mg/L<sup>-1</sup> y del 40% en 60 mg/L<sup>-1</sup>.
- La DQO y la disminución del color estuvieron en función del tiempo de tratamiento y la capacidad de la planta para absorber el colorante.
- El pH de todas las peceras inicio en valores neutros, bajo a niveles ácidos y al final ascendió a valores alcalinos entre 7.9 y 8.4; debido a la interacción del colorante con la fase acuosa.
- A mayor concentración de colorante menor fue la capacidad de absorción de los lirios y por ende mayor saturación.
- La interacción de la molécula de colorante con el medio acuoso ocurrió por la diferencia de Cargas entre el dipolo negativo del colorante y el ion hidrógeno cargado positivamente.

- Esta interacción es responsable del aumento de la concentración de los iones hidroxilo (OH) propiciando el cambio de pH a valores básicos como se mencionó previamente.

Se hace notar que el único parámetro fisicoquímico que se manejó en esta investigación y que está señalado en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMANART-1996, fue el de pH. Los valores finales de este parámetro fueron entre 7.9 -8.4 con lo cual no se infringen los límites permisibles que marca dicha norma. En relación con la Demanda Química de Oxígeno (DQO), las normas oficiales mexicanas no la contemplan, el parámetro considerado es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). No obstante, el Límites establecidos por el manual de BM para abatimiento y prevención de la contaminación en cuerpos de agua (1998) consideran a la DQO y marcan como su concentración límite para las industrias del giro industrial de colorantes el valor de 150 mgL<sup>-1</sup>. En este caso la investigación considero concentraciones más bajas, por lo cual no hay punto de referencia para señalar si este proceso abatiría concentraciones más altas a 150 mgL<sup>-1</sup>.

Con esta aseveración podría plantearse este tratamiento como un paso final de pulimiento en el cual las concentraciones del colorante serian remanentes de tratamiento previos del agua residual de la empresa que utiliza dicho colorante.

En resumen, la investigación demostró la efectividad de la fitorremediación a través de la *Eichhornia crassipes* como tratamiento biológico, útil para emplearse como tratamiento final posterior a los procedimientos secundario o terciario en plantas tratadoras de aguas residuales, específicamente las contaminadas con colorantes. Finalmente, se plantea la posibilidad de emplear esta tesis como antecedente para futuras investigaciones que decidan retomarla o mejorarla con algún otro tratamiento, incluso no se descarta la aplicación de la fotosíntesis a través de la *Eichhornia crassipes* en alguna industria textil, alimenticia o química para reducir la concentración de colorantes en aguas residuales.

# Anexos

## Anexo 1. Modelos matemáticos para D.Q.O.

Tabla 1. Valores para el modelo matemático de 10 mgL<sup>-1</sup>.

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>LOG X</b>	<b>LOG Y</b>	<b>LOG X LOG Y</b>	<b>(LOGX)<sup>2</sup></b>
<b>0</b>	25.51	-	1.4067	-	-
<b>1</b>	14.31	0	1.1556	0	0
<b>3</b>	10.64	0.4771	1.0269	0.4591	0.2276
<b>5</b>	9.09	0.6989	0.9585	0.6698	0.4884
<b>7</b>	8.36	0.8450	0.9222	0.7792	0.714
<b>9</b>	8.25	0.9542	0.9165	0.8745	0.9104
<b>12</b>	8.16	1.079	0.9116	0.9836	1.1642
<b>15</b>	8.02	1.1760	0.9041	1.0632	1.3829
<b>18</b>	7.95	1.2552	0.9003	1.13	1.5755
<b>20</b>	7.88	1.3010	0.8965	1.1663	1.6926
<b>26</b>	7.42	1.4149	0.8704	1.2315	2.001
<b>29</b>	6.99	1.4623	0.8444	1.2347	2.1383
<b>32</b>	6.88	1.5051	0.8382	1.2615	2.2653
<b>177</b>		12.1687	12.5519	10.8534	14.5602

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

**Tabla 2. Valores para el modelo matemático de 20 mgL<sup>-1</sup>.**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Ln Y</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>X Ln Y</b>
<b>0</b>	51.02	3.9322	0	0
<b>1</b>	40.42	3.6918	1	3.6918
<b>3</b>	35.906	3.5807	9	10.7421
<b>5</b>	33.23	3.5034	25	17.517
<b>7</b>	30.162	3.4065	49	23.8455
<b>9</b>	27.886	3.3281	81	29.9529
<b>12</b>	25.89	3.2538	144	39.0456
<b>15</b>	23.78	3.1688	225	47.532
<b>18</b>	22.134	3.0971	324	55.7478
<b>20</b>	20.653	3.0278	400	60.556
<b>26</b>	16.845	2.8240	676	73.424
<b>29</b>	16.43	2.7991	841	81.1739
<b>32</b>	14.7	2.6878	1024	86.0096
<b>177</b>		42.3011	3799	529.2382

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

**Tabla 3. Valores para el modelo matemático de 30 mgL<sup>-1</sup>.**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Ln Y</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>X Ln Y</b>
<b>0</b>	76.53	4.3376		0
<b>1</b>	54.849	4.0045		4.0045
<b>3</b>	48.12	3.8736		11.6208
<b>5</b>	42.31	3.7450		18.725
<b>7</b>	38.43	3.6488		25.5416
<b>9</b>	35.871	3.5799		32.2191
<b>12</b>	32.709	3.4876		41.8512
<b>15</b>	27.699	3.321		49.815
<b>18</b>	23.826	3.1707		57.0726
<b>20</b>	21.09	3.0487		60.974
<b>26</b>	16.911	2.8279		73.5254
<b>29</b>	15.72	2.7549		79.8921
<b>32</b>	13.405	2.5956		83.0592
<b>177</b>		44.3958	0	538.3005

Fuente: Elaborada por el propio autor, 2016.

# Referencias.

Agua.org (2015). "Fases del proceso de depuración en el tratamiento de aguas residuales". [En línea]. México, disponible en *Biblioteca Temática*: [http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com\\_content&id=2809:fases-del-proceso-de-depuracion-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales&Itemid=84](http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&id=2809:fases-del-proceso-de-depuracion-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales&Itemid=84) [Consultado el día 13 de mayo de 2015]

Aguilar, O.; Ángeles, C. y R. Rodríguez, (2010). "Remoción de colorantes de efluentes de la industria textil". Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico [En línea]. Ciudad de México, Universidad Autónoma Metropolitana, disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/UAMI15676.pdf> [Consultado el día 04 de junio de 2015]

Alatorre, F. (2007) *Diseño de reactores empacados para la remoción de color en aguas residuales industriales*. [En línea]. Tesis de maestría. México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2099/alatorreacosta.pdf?sequence=1> [Consultado el día 27 de junio de 2015]

Alatorre, F.A. Moeller, G. (2006). "Influencia de las características hidráulicas y geométricas de biofiltros empacados sobre la eliminación de un colorante azo" XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.

Alexander, M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation* 2nd ed. AcademicPress, London.

Almaguer (ed.), (2013). "Contaminación de agua por colorantes y propuesta de remediación" en Departamento de Química del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI). [En línea]. México, disponible en: <http://www.cucei.udg.mx/noticia/contaminacion-de-agua-por-colorantes-y-propuesta-de-remediacion> [Consultado el día 07 de Marzo de 2015]

Ambientum (2009). "Metales pesados en la Ria de Huelva" en boletino/noticias. [En línea]. Disponible en: <http://www.ambientum.com/boletino/noticias/Metales-pesados-en-los-peces-de-la-ria-de-Huelva.asp> [Consultado el día 15 de enero de 2015].

Anaya, K., (2012). "Actividad fotocatalítica de una heteroestructura de TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub>: F/Sustrato en una solución de azul de metileno" [en línea]. Tesis para obtener el grado de Ingeniero en alimentos. México, Universidad Tecnológica de La Mixteca, disponible en: [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/11519.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11519.pdf) [Consultado el día 13 de mayo de 2015].

Andía, Yolanda, (2000). "Tratamiento del agua. Coagulación y floculación". Curso de Ingeniería [En línea] Perú, SEDAPAL, disponible en: [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154) [Consultado el día 13 de mayo de 2015]

Anjaneyulu Y., Sreedhara-Chary N. y Suman-Raj S., (2005). "Decolourization of industrial effluents – available methods and emerging technologies" a review. *Rev. Environ. Sci. Technol.*, 4, 245–273.

ArgenBio. (2007). "La Biorremediación" en *La Biotecnología*. [En línea]. Argentina, disponible en: <http://www.argenbio.org/index.php?action=novedades&note=202> [Consultado el día 14 de Febrero de 2015]

ATL (2014). "Aceleran proceso para tratar aguas industriales" en *Agua e Industria*. [En línea]. México, disponible en: [http://atl.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7659:aceleran-proceso-para-tratar-efluentes-industriales&catid=74:agua-e-industria&Itemid=484](http://atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=7659:aceleran-proceso-para-tratar-efluentes-industriales&catid=74:agua-e-industria&Itemid=484) [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

Atlas R.M. y Bartha, R. (2001). "Ecología Microbiana & Microbiología Ambiental". , Madrid, Pearson Educación.

Banat I.; Nigam P.; Singh D.; Marchant R., (1996). "Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes". *Process Biochem.*, Volumen 31.

Bautista, L., (2011). "*Degradación de colorantes (azul de metileno) por métodos electroquímicos*". Tesis para obtener el grado de Ingeniera Química. México, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/16305412.pdf> [Consultado el día 15 de diciembre de 2014].

Bishop P. L, Coughlin M.F:Kinkle B.K.(2001). "Degradation of acid orange 7 in an aerobic biofilm" en *ScienceDirect.com*. Volumen 46, Ene./Feb., Chemosphere; 46 (1) 11-19.

Blesa M.; Farfan Torres E. M.; Mercado A. G. Sham E. L. (2001). "Synthesis and characterization of SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pillared montmorillonites". A Clay Odyssey, Proceedings of the International Clay Conference, 12th, Bahia Blanca, Argentina, 595-602.

Calvo, D. (2015). "Azul de Metileno" [en línea]. Cuba, disponible en: <http://fnmedicamentos.sld.cu/index.php?P=FullRecord&ResourceId=764> [Consultado el día 13 de mayo de 2015].

Cámara, L.; Hernández, M. y L. Paz, (2001). "Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias" en *Revista Ambientalex.info*. [En línea], E. Global Services Ltda disponible en: <http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Mandisplatraaguresaliar.pdf> [Consultado el día 13 de mayo de 2015]

Carpena, R. O., Bernal, M. P. (2007). "Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos". *Ecosistemas*. 16: 1-3.

Carrión, C., *et al.* (2012). "Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales" en *Revista Scielo*[En línea]. Vol.46, número 6, agos./sep., México, disponible en: [www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952012000600007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000600007) [Consultado el día 22 de noviembre de 2014]

Castillo, (2011). "Métodos de separación de mezclas" en *Docencia/Escuela Preparatoria Número cuatro (UAEH)* [En línea]. México, disponible en: [http://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Presentaciones/prepa4/quimica/separacion.pdf](http://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/prepa4/quimica/separacion.pdf) [Consultado el día 13 de mayo de 2015]

CCM. (2015). "Azul de metileno. Definición" [en línea]. México, disponible en: <http://salud.ccm.net/faq/14550-azul-de-metileno-definicion>[Consultado el día 20 de diciembre de 2015].

Cedillo, C.; Rosales, L.; Constantino, F.; (2001). "Linfoquistosis en peces tetra fantasía (*Parambassis baculis*) de la Ciudad de México" [en línea]. Volumen 32, número 01, Sep./Ene., México, disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/rvm/vol32-01/RVM32111.pdf> [Consultado el día 13 de mayo de 2015].

Centro de Edafología y Biología Aplicadas del Segura (CEBAS), (2007). "Usos alternativos para lodos procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas: biorrecuperación de suelos contaminados con hidrocarburos en ambientes semiáridos". [En línea] España, disponible en: [http://www.biorrehid.cebas.csic.es/ant\\_fitorremediacion.html](http://www.biorrehid.cebas.csic.es/ant_fitorremediacion.html) [Consultado el día 18 de Febrero de 2015]

Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente (CIEMA), (2005). "Tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales". Proyecto ASTEC SUCHER & HOLZER. Austria - Nicaragua. Managua, Nicaragua. 43 p

CERIDE, (2014). "Biorremediación" en *publicaciones*. [En línea]. Argentina, disponible en: <http://www2.ceride.gov.ar/wwwisis/publica/biorremediacion.htm> [Consultado el día 22 de noviembre de 2014]

CHINAIMPORTAL (2014) "Reglamento REACH y químicos prohibidos al importar desde China" China Importal in Certificados, Guías de Productos [En Línea] disponible en: <http://www.asiaimportal.es/blog/reglamento-reach-y-quimicos-prohibidos-al-importar-desde-china/q=QUE+TIPO+DE+COLORANTE+SE+UNA+PARA+LOS+JEANS> [Consultado el día 08 de agosto de 2015]

CHT DE MÉXICO, S.A. DE C.V. (2004) "Sostenibilidad" [En línea]. Torreón, Coahuila de Zaragoza, disponible en: [http://www.chtmexico.com/cht/web.nsf/id/pa\\_asociaciones\\_e\\_iniciativas\\_es.html](http://www.chtmexico.com/cht/web.nsf/id/pa_asociaciones_e_iniciativas_es.html) [Consultado el día 17 de julio de 2015]

Chung, K.T., Cerniglia, C.F., (1992). "Mutagenicity of azo dyes: structure-activity relationships". *Mutation. Research*; 277 (3) 201-220.

CIDTA (2015). "Electrodialisis" en *Cursos, ETAP* [en línea]. España, disponible en: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/ELECTRODIALISIS.pdf> [Consultado el día 13 de mayo de 2015].

CIMPA, (2013). "Ficha técnica Azul de metileno" [en línea]. Colombia, disponible en: <http://www.cimpaltda.com/modulo/quimicos/azul%20de%20metileno.pdf> [Consultado el día 13 de mayo de 2015].

Colour-Index, (2015). "What is the Colour Index?" en *Introduction to the Colour Index*. [En línea], disponible en: <http://www.colour-index.com/> [Consultado el día 17 de Julio de 2015]

Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), (2013). "Estadística del agua en México, edición 2013" en *Publicaciones*. [En línea]. México, disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf> [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), (2015). “Humedales de México” en *La CONANP y los Humedales*. [En línea]. México, disponible en: [http://ramsar.conanp.gob.mx/la\\_conanp\\_y\\_los\\_humedales.php](http://ramsar.conanp.gob.mx/la_conanp_y_los_humedales.php) [Consultado el día 3 de Enero de 2015]

CONAGUA (2013). “Estadísticas del agua en México, Edición 2013”. [en línea]. México, disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf> [Consultado el día 03 de marzo de 2016].

CONAGUA (2015). “Estadísticas del agua en México Edición 2015”. [En línea], México, disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf> [Consultado el día 15 de enero de 2017]

Consejo Consultivo del Agua, A.C. (2017). “Situación y contexto de la problemática del agua en México”. [En línea], México, disponible en: <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/diagnosticos-del-agua> [Consultado el día 15 de enero de 2017]

Consejo de Europa, (1967). “La carta europea del agua” en *Ayuntamiento de Benissa* [En línea]. España, disponible en: [http://aiguesdebenissa.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=6&Itemid=2&lang=es](http://aiguesdebenissa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=2&lang=es) [Consultado el día 22 de mayo de 2015].

Contralinea (2013). “Estado responsable de la contaminación del agua”. [En línea] México, disponible en: <http://www.contralinea.com.mx/archivo-revista/index.php/2013/01/16/estado-mexicano-responsable-de-la-contaminacion-jdel-agua/> [Consultado del día 15 de enero de 2017]

Cortazar, A., *et al.*, (2009). “Contaminación generada por colorantes de la industria textil” en *Publicaciones en línea*. [En línea]. México, disponible en: <http://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html> [Consultado el día 20 de noviembre de 2014]

Cruz, A. and Buitrón, G. (2001). “Biodegradation of disperse blue 79 using sequenced anaerobic/aerobic biofilters”. *Water Science and Technology*. 44(4):159-66.

De la Peña, M., Ducci, J. y Zamora, V. (2013). “Tratamiento de aguas residuales en México”. Banco Interamericano de Desarrollo [En línea], México, disponible en: [http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_en\\_mexico.pdf](http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento_de_aguas_residuales_en_mexico.pdf) (Consultado el día 06 de Marzo de 2015)

De la Torre, S., (1975) *Manual básico de microtecnia biológica*. Segunda edición, La Habana, Instituto Cubano.

Delgadillo, López, *et al.*, (2011). “Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación” en *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. [En línea]. México, disponible en:

[http://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI\\_IntGenAmb/Otilio\\_Sando/1.pdf](http://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Otilio_Sando/1.pdf) [Consultado el día 21 de noviembre de 2014]

Di Paola, (2010). "Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación" en *CEUR-CONICET*. [En línea]. Argentina, disponible en: <http://www.ceur-conicet.gov.ar/imagenes/Biorremediacion2.pdf> [Consultado el día 19 de febrero de 2015]

Dias A.D., Sampaio A. y Bezerra R.M., (2007). Environmental applications of fungal and plants systems: decolourisation of textile wastewater and related dyestuffs. En *Environmental Bioremediation Technologies* (Editores Singh S.N. y Tripathi R.D.) Springer Berlin Heidelberg, 445-463.

Diseños y Soluciones Sostenibles (DDS) S.A., (2012). "Osmosis inversa (RO)" en *Ingeniería para un desarrollo sostenible*. [En línea]. Ecuador, disponible en: [http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis\\_inversa.pdf](http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf) [Consultado el día 29 de mayo de 2015]

Dos-Santos A., Cervantes F. y Van-Lier J., (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for an aerobic biotechnology. *Bioresour. Technol.*, 98, 2369-2385.

Droste, R.L. (1997). "Theory and practice of water and wastewater treatment". Michigan, Editorial Wiley.

Dushenkov, V., Kumar, P. B., Motto, H., Raskin, I. (1995). "Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams". *Environmental Science & Technology*. 29:1239-1245.

Eapen, S., Singh, S., D'Souza, S. F. (2007). "Advances in development of transgenic plants for remediation of xenobiotic pollutants". *Biotechnology Advances*. 25:442-451.

EHP (Environmental Health Perspectives), (2013). "PCB NO OBSOLETOS. Un segundo vistazo a los subproductos de la fabricación de pigmentos" en *Environmental Health Perspectives* [en línea]. Volumen 121, número 3, marzo EUA, disponible en: [http://bvs.insp.mx/rsp/articulos/articulo\\_e3.php?id=002826](http://bvs.insp.mx/rsp/articulos/articulo_e3.php?id=002826) [Consultado el día 20 de junio de 2015].

El Financiero (2015). "Opinión. Contaminación del agua". [En línea], México disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/opinion/contaminacion-del-agua.html> [Consultado del día 15 de enero de 2017]

Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), (2015). "Tipos de tratamientos en aguas residuales". [En línea]. Colombia, disponible en: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoencanales/residuales/Tipos%20de%20Tratamiento.htm> [Consultado el día 13 de mayo de 2015]

European Commission (EC). (2003). "Technical guidance document on risk assessment" en *Institute for Health and Consumer Protection* [en línea]. Italia, disponible en: [https://echa.europa.eu/documents/10162/16960216/tgdpart2\\_2ed\\_en.pdf](https://echa.europa.eu/documents/10162/16960216/tgdpart2_2ed_en.pdf) [Consultado el día 13 de mayo de 2015].

Eweis, J.B.; Ergas, S.J.; Chang, D.P.V. y Schroeder, E.D. (1999). *Principios de biorrecuperación*. McGrawHill, Madrid.

Facultad de Filosofía y Letras (FILO) (2016). "Trabajo Práctico N° 4: Balance Hídrico" en *Carreras de Grado* [En línea]. Argentina, disponible en: <http://www.filo.uba.ar/contenidos/carreras/geografia/catedras/climatologia/sitio/bcehidrico.pdf> [Consultado el día 15 de abril del 2016]

FAO (1995). "Norma general del codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos". [En línea] disponible en: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/livestockgov/documents/CXS\\_193s.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXS_193s.pdf)

Fernández, J. *et al*, (2006). "Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación" [en línea]. España, disponible en: <https://es.scribd.com/document/128246321/Manual-Depuracion-Macrofitas> [Consultado el día 20 de abril del 2015].

Florentina, (2010). "Fitorremediación. Alcances y aplicación en el agro ecosistema argentino" en *Estrucplan*. [En línea]. Argentina, disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/imprimirss.asp?IDArticulo=2371> [Consultado el día 22 de noviembre de 2014]

Fundación por la Socialdemocracia de las Américas, A.C. (FUSDA), (2008). "Panorama global de la escases del agua" en *Revista Nueva Visión Socialdemócrata. Medio ambiente y desarrollo: hacia un manejo sustentable del agua*. [En línea]. Enero-marzo 2008, FUSDA, disponible en: <http://www.fusda.org/revista11pdf/Revista11-4PANORAMAGLOBALDELAESCASEZDELAGUA.pdf> [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

García, B. y Solís, J. (2008) "¿Contaminando con sus jeans?" en *Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana*, vol. 21, no. 1, [En línea]. Veracruz, Enero-Abril 2008, disponible en: <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol21num1/articulos/contaminando/index.html> [Consultado el día 28 de julio de 2015]

García, Z., (2012). "Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas". Tesis para obtener el título de Ingeniero Sanitario [En línea]. Lima-Perú, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental, disponible en: [http://www.lima-water.de/documents/zgarcia\\_tesis.pdf](http://www.lima-water.de/documents/zgarcia_tesis.pdf) [Consultado el día 20 de noviembre de 2014]

Garzón, R., (2009). "*Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de Agave tequilana Webber var. Azul.*" [En línea]. Tesis para obtener el grado de Microbiólogo Industrial. Colombia, Facultad de Ciencias ¿, Universidad Javeriana, disponible en: <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis217.pdf> [Consultado el día 04 de enero del 2015].

Gobierno de España (2004) "Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado" del Ministerio de la Presidencia [En línea]. España, 05 de octubre de 2004, disponible en: <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2004-17096> [Consultado el día 15 de junio de 2015]

GÓMEZ, L. *et al*. (2000). "Fotooxidación de vertidos químicos: Revisión y experiencias de procesos de oxidación avanzada" en *Ingeniería Química*. Madrid. No. 371.

Gómez, M. (2009) "Contaminantes Químicos" en Revista Innovación y Experiencias Educativas, no. 24, [En línea]. Noviembre de 2009, Granada, disponible en: [http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod\\_ense/revista/pdf/Numero\\_24/MARIA%20FABIOLA\\_%20GOMEZ%20ALAVERT\\_1.pdf](http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_24/MARIA%20FABIOLA_%20GOMEZ%20ALAVERT_1.pdf) [Consultado el día 23 de julio de 2015]

González, L., Escamilla, E. (2006) "Estudio de la degradación de un colorante azo rojo reactivo en un biorreactor anaerobio de flujo ascendente". Tesis para obtener el grado de Doctor [En línea]. México, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en: <http://www.iqcelaya.itc.mx/~richart/TesisDoctorado/2006%20Gonz%C3%A1lez%20Guti%C3%A9rrez.pdf> [Consultado el día 30 de abril de 2015]

Grupo CHT/BEZEMA (2010) "Colorantes de BEZEMA: Sistemática de selección" [En línea]. Montlingen, Suiza, disponible en: [http://www.cht.com/cht/web.nsf/id/pa\\_colorantes\\_de\\_bezema\\_es.html](http://www.cht.com/cht/web.nsf/id/pa_colorantes_de_bezema_es.html) [Consultado el día 18 de junio de 2015]

Haug, W., Schmidt, A., Nortemann, B., Hempel, D., Stolz, A., Knackmuss, H. (1991). Mineralization of sulfonated azo dyemordant yellow 3 by a 6-aminonaphthalene-2-sulfonate-degrading bacterial consortium. *Applied and environmental microbiology*, 57(11):3144-3149.

Hidalgo, J; Montano, J., y Estrada, M., Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, Vol 14, 2005.

Hincapié, M.; Sepúlveda M., (2002). "La fotocatalisis en el tratamiento de aguas contaminadas" en Revista Ingeniería. Universidad de Medellín. Medellín. No 602.

Hutchinson, S.L., A.P. Schwab y M.K. Banks. (2001). "Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of irrigation techniques and scheduling". *J. Environ. Qual.* 30: 1516-1522

Imasd (2007). "Oxígeno disuelto" en *I+D Asociación civil de investigación y desarrollo* [En línea]. Uruguay, disponible en: [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso\\_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf) [Consultado el día 15 de abril del 2016]

IMTA (2013). "Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria textil". [En Línea] disponible en: <http://repositorio.imta.mx:8080/cenca-repositorio/bitstream/123456789/905/1/TC-1223.1.pdf> (Consultado el día 23 de junio de 2015)

INECC (2007) "NORMA Oficial Mexicana NOM-065-ECOL-1994, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de las industrias de pigmentos y colorantes" [En Línea] Delegación Coyoacán, Ciudad de México, disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/228/65.html> [Consultado el día 02 de agosto de 2015]

INECC (2007) "NORMA Oficial Mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil" [En línea]. Delegación Coyoacán, Ciudad de México, disponible

en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetitas/215/cca14.html> [Consultado el día 28 de julio de 2015]

INEGI (2002). "Estructura del SCIAN México". [En línea], México, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/metodologias/censos/scian/estructura.pdf>. [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2007). "Ley para el control de sustancias tóxicas de los Estados Unidos de América" [En línea]. México, disponible en *Consulta de publicaciones*: [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/33/ley\\_para.html](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/33/ley_para.html) [Consultado el día 16 de diciembre de 2015]

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2002). "Estructura del SCIAN México". [En línea], México, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/metodologias/censos/scian/estructura.pdf>. [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2013). "La industria textil y de vestido en México, 2013". [En línea] México, disponible en: [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/Textil/2013/702825056056.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/Textil/2013/702825056056.pdf). [Consultado el día 20 de noviembre de 2014]

Interapas (2015). "Sistema de tratamiento de aguas residuales". En línea México, disponible en: [http://interapas.mx/files/cultura\\_del\\_agua/folletos/sistema\\_de\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf](http://interapas.mx/files/cultura_del_agua/folletos/sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales.pdf) (Consultado 13 de mayo de 2015)

Jaramillo, M. y E. Flores, (2012). "*Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemnaminor (Lenteja de agua), y Eichorniacrassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera*". Tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental. Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca [En línea]. Ecuador, disponible en: <https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCQQFjAB&url=http%3A%2F%2Fspace.ups.edu.ec%2Fbitstream%2F123456789%2F2939%2F1%2FUPS-CT002482.pdf&ei=hgGvVLzPqpyQTByYKQAw&usg=AFQjCNGd4hHtcJ0QrfEmZKk-TEenJWV7B2w&bvm=bv.83134100,bs.1,d.aWw> [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

Jiménez, B. (2001) "Procesos de depuración" México: Limusa, 2001. Pag. 204 [En línea] México, disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=8MVxlyJGokIC&printsec=frontcover&dq=definicion+de+contaminacion+hidrica&hl=es&sa=X&ei=QemdVP-iOImzyQTJ6YKgAw#v=onepage&q=definicion%20de%20contaminacion%20hidrica&f=false> [Consultado el día 14 de Febrero de 2015]

Kandelbauer A. y Guebitz G.M., (2005). Bioremediationforthedecolorization of textile dyes - a review. *Environmental Chemistry* (Editores: Lichtfouse E, Dudd S, Robert D) Springer Berlin Heidelberg.

Kirk-Othmer, (1993) "Azo dyes. Encyclopedia of Chemical Technology". Nueva York, Editorial John Wiley & Son.

Kuhad R.C., Sood N., Tripathi K.K., Singh A. y Ward O.P., (2004). Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Adv. Appl. Microbiol.*, 56, 185-213.

Lannacone, J.; Alvaríño, L., (2007). "Ecotoxicidad acuática de dos colorantes y de tres Antiparasitarios de importancia en acuicultura en daphnia magna" en Scielo [en línea]. v.6 n.1-2, diciembre, Perú, disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162007000100012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162007000100012&script=sci_arttext) [Consultado el día 20 de enero de 2015].

Legrini, O., Oliveros. E., and Braun, A. M., (1993). "Photochemical processes for water treatment". Chem. Rev., 93, 671-698.

Lenntech (2015). "Electrólisis" [en línea]. España, disponible en: <http://www.lenntech.es/electrolisis.htm> [Consultado el día 28 de mayo de 2015].

Liu, G., et al. (2000). "Photooxidation pathway of sulforhodamine-B dependence on the adsorption mode on TiO<sub>2</sub> exposed to visible light radiation" en Environmental Science & Technology. Vol. 34, agosto.

Lorenzo, Y.; Obaya. M., (2005). "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I" en Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) [en línea]. Volumen XXXIX, núm. 1, Cuba, disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf> [Consultado el día 20 de junio de 2015].

Loya, (2013) "Tecnologías para la restauración de suelos contaminados por hidrocarburos" de I.BQ. Daniela Itzel Loya Del Angel [En línea], disponible en: <http://www.uv.mx/pozarica/egia/files/2012/10/Loya-Del-Angel-Daniela-Itzel.pdf> (Consultado 13 de mayo de 2015)

Malato, S.; Maldonado M. Blanco, J.; (2001). "Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante fotocatalisis solar". Madrid, Ciemat.

Manahan, S. (2007) "Tipos de contaminantes en el agua (orgánicos e inorgánicos)" México, DF [u.a.]: Reverté Eds. [u.a.], 2007 [En línea], México, disponible en: [https://books.google.com.mx/books?id=5NR8DIk1n68C&pg=PA145&dq=contaminacion+del+agua&hl=es&sa=X&ei=L\\_CdVLqZCMn3yQS2qYFI&sqi=2&ved=0CCQQ6AEwAA#v=onepage&q=contaminacion%20del%20agua&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=5NR8DIk1n68C&pg=PA145&dq=contaminacion+del+agua&hl=es&sa=X&ei=L_CdVLqZCMn3yQS2qYFI&sqi=2&ved=0CCQQ6AEwAA#v=onepage&q=contaminacion%20del%20agua&f=false) (Consultado el día 08 de Marzo de 2015)

Mancilla, E.; Mancilla, C.; Gutarra, Rodríguez, J. (2007). "Tratamiento de residuos líquidos de la industrial de celulosa y textil" en Cyted (Ciencia y tecnología para el desarrollo) [en línea]. Argentina, disponible en: <http://www.CNEA.gob.ar/xxi/ambiental/cyted/20cap13.pdf> [Consultado el día 14 de diciembre de 2014].

Margalef, R. (1981). Ecología. Barcelona: Omega.

Martínez J. et al., (2007). "Fitorremediación de un suelo contaminado con combustóleo usando *Phaseolus Coccineus* y fertilización orgánica e inorgánica agrociencia, Vol. 41, Núm. 8, Pp. 817-826.

Mathur N., Krishnatrey R., Sharma S. y Sharma K.P., (2003). "Toxic effects of textile printing industry effluent on liver and testes of albino rats" en Environ. Contam. Toxicol.,

Mauri, T., (2013). "¿Teñir para evitar morir? El azul de metileno es beneficioso para los ratones con Huntington" [en línea], disponible en: <http://es.hdbuzz.net/110> [Consultado el día 20 de diciembre del 2015].

Mendoza, J. (1998) "Ciencia y tecnología del medio ambiente" Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones, 1998, pp. 242 [En Línea] disponible en: [https://books.google.com.mx/books?id=jKtTZJ71ljgC&pg=PA69&dq=clasificacion+de+contaminantes&hl=es&sa=X&ei=1tL7VJunE5b\\_yQTbkYFQ&ved=0CCAQ6AEwAQ#v=onepage&q=clasificacion%20de%20contaminantes&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=jKtTZJ71ljgC&pg=PA69&dq=clasificacion+de+contaminantes&hl=es&sa=X&ei=1tL7VJunE5b_yQTbkYFQ&ved=0CCAQ6AEwAQ#v=onepage&q=clasificacion%20de%20contaminantes&f=false) [Consultado el día 04 de agosto de 2015]

Mestanza, M., (2012). "Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes" [en línea]. Tesis para obtener el grado de doctor. España, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, disponible en: <http://eprints.ucm.es/15692/1/T33799.pdf> [Consultado el día 12 de enero del 2015].

Metcalf, Eddyinc (1995). "Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización" McGraw-Hill/interamericana de España S.A.

Mills A.; Le Hunte S., (1997). "An overview of semiconductor photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology". Department of Chemistry, University of Wales Swansea.

Moeller, G.; Garzón, M.A., 2003. "Desarrollo de Tecnologías no convencionales para el tratamiento de efluentes de la fabricación de colorantes del tipo Azo". Anuario IMTA. [En línea], disponible en: <https://www.imta.gob.mx/historico/instituto/historial-proyectoswpr/tc/2003/CA2-Desarrollo.pdf>. [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

Molina, A.; K. Cezón, (2006). "Flora acuática: macrófitos" [en línea]. España, disponible en: [http://www.magrama.gob.es/es/agua/formacion/06-Macrofitos-Santos\\_Cirujano\\_tcm7-174291.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/formacion/06-Macrofitos-Santos_Cirujano_tcm7-174291.pdf) [Consultado el día 09 de marzo del 2015].

Monotny, V. and Olem, H. (1994). "Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution". Van Nostrand Reinhold, New York.

Montalvo, C., (2010). "Técnica histológica" en Histología UNAM [en línea]. México, disponible en: [http://histologiaunam.mx/descargas/ensenanza/portal\\_recursos\\_linea/apuntes/3\\_tecnica\\_histologica.pdf](http://histologiaunam.mx/descargas/ensenanza/portal_recursos_linea/apuntes/3_tecnica_histologica.pdf) [Consultado el día 20 de enero del 2015].

National Geographic (2013). "Contaminación del agua". [En línea], España, disponible en: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/aguas-dulces/contaminacion-agua>. [Consultado el día 26 de diciembre de 2014]

Nedelkoska, T. V., Doran, P. M. (2000). "Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerulescens*". Biotechnology and Bioengineering. 67: 607-615

NEGI (2011). "Sobreexplotación y contaminación". [En línea] México, disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/sobreexplota.aspx?tema=T> [Consultado del día 15 de enero de 2017]

Nuevatribu.es (2011). "La crisis del agua en la India". [En línea] España, disponible en: <http://www.nuevatribuna.es/articulo/medio-ambiente/la-crisis-del-agua-en-la-india/20110107141748040047.html> [Consultado el día 6 de Marzo de 2015]

O'Neill C., Hawkes, F.; Estevez, S.; Hawkes D. y Wilcox S., (1999). "Anerobic and aerobic of simulated textile effluent" en *Journal Chemical Technology and Biotechnology*; Septiembre, volumen 74, John Wiley & Sons, Ltd.

Pant, D., Adholeya, A. (2007). "Biological Approaches for treatment of distillery wastewater: A review. *Bioresource Technology*". Vol. 98, Oct./Feb., en Springer Science.

Pearce, C., Lloyd, J., Guthrie, J. 2003. The Removal of color from textile wastewater using Whole Bacterial Cell, Dyes and pigments 58: 179-196 [En línea], disponible en: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/uk-ac-man-scw:1a8276> [Consultado el día 6 de Marzo de 2015]

Pedraza, Chan, Gunter, Geissler, Cedillo Ramírez. (2007). "Biodegradación de colorantes azo bajo condiciones reductoras por bacterias gram-negativas mesofílicas aisladas de diversos ambientes". [En línea] México, disponible en: [http://www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-07.pdf](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-07.pdf). [Consultado el día 20 de noviembre de 2014].

Pérez (2011). "Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas". En línea, México, disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/29490/1/PerezAlarconyCamachoAlcala.pdf> (Consultado 13 de mayo de 2015)

Pérez, A. (2009) "Degradación de los colorantes Negro reactivo 5, Rojo directo 28 y Verde básico 4 en presencia de aditivos por ozono". Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Química [En línea]. Ciudad de México, Instituto Politécnico Nacional, 18 de noviembre de 2009, disponible en: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8990/DEGRACOLO.pdf?sequence=1> [Consultado el día 18 de mayo de 2015]

Pérez, J. (2013) "Bioadsorción de azul de metileno por *Salvinia minima* en un sistema de Columnas empacadas". Tesis para acreditar la Experiencia Educativa: Experiencia Recepcional [En línea]. Xalapa, Veracruz, Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, junio 2013, disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/34033/1/perezmoralesjuanmanuel.pdf> [Consultado el día 24 de noviembre de 2015]

Piña, S., (2007). "Decoloración biológica del colorante azul directo 2 en un filtro anaerobio/aerobio". Tesis para obtener el grado de Ingeniería Ambiental. [En línea]. México, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1732/pi%C3%B1a%20amon%20dragon.pdf?sequence=1> [Consultado el día 20 de enero del 2015].

Porque Bioquímica (PQBio) (2006). "Biorremediación: organismos que limpian el ambiente". [En línea] Argentina, disponible en: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQM\\_fitorremediacion\\_biotec\\_\\_25656.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQM_fitorremediacion_biotec__25656.pdf) [Consultado el día 14 de Febrero de 2015]

Puentes, D. (2010) "Determinación de parámetros de un modelo axial y en estado transitorio de la biosorción de azul de metileno mediante biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* inmovilizada en alginato de calcio en columna empacada". Tesis que para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Procesos Sustentables [En línea]. Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo

León, Facultad de Ciencias Químicas, julio 2010, disponible en: <http://eprints.uanl.mx/2686/1/1080147633.pdf> [Consultado el día 12 de marzo de 2015]

Punte, M. (2008) "Higiene y Seguridad en la Industria Textil" [En línea]. Ecuador, 08 de noviembre de 2008, disponible en: <http://www.artisam.org/descargas/pdf/HIGIENE%20Y%20SEGURIDAD%20EN%20EL%20TRABAJO.pdf> [Consultado el día 21 de mayo de 2015]

Químico Técnica Industrial (2016). "Medición del color" [En línea] Republica Dominicana, disponible en: <http://quimicotecnica.com/tip-color-measurement/> [Consultado el 18 de noviembre de 2016]

Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hasim, R., & Ahmad, A. (2010). "Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents" en *Journal Hazard*, 177:70-80.

Ramallo, R.; Jiménez, D.; Lora B. (1996). "Introduction to Wastewater Treatment Processes" Segunda edición, España, Editorial Reverte.

Ramos, R.; Sepúlveda, R., Villalobos, F. (2003). "EL AGUA EN EL MEDIO AMBIENTE, Muestreo y análisis". Primera edición, México, Editorial Plaza y Valdes, S.A. de C.V.

Real Decreto 1406/1989, (2004). "ORDEN PRE/3159/2004, de 28 de septiembre, por la que se modifica el anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, por el que se imponen limitaciones a la comercialización y al uso de ciertas sustancias y preparados peligrosos (métodos de ensayo de colorantes azoicos)." en *Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado* [En línea], número 240, octubre, España, Editor: Ministerio de la Presidencia, disponible en: <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2004-17096> [Consultado el día 15 de marzo de 2016]

Recinto Universitario de Mayagüez (UPRM) (2016). "Segunda parte. Parámetros físico-químicos: conductividad" [En línea]. Puerto Rico, disponible en *Manuales*: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-conductividad.pdf> [Consultado el día 15 de abril del 2016]

Red Textil argentina.com.ar (2012) "Colorantes Sintéticos" [En línea]. Argentina, disponible en: <http://www.redtextilargentina.com.ar/index.php/fibras/f-ennoblecimiento/214-insumos-para-el-ennoblecimiento-de-fibras/colorantes-textiles/colorantes-sinteticos/287-colorantes-sinteticos> [Consultado el día 23 de julio de 2015]

Red Textil argentina.com.ar (2012) "Colorantes Textiles" [En línea]. Argentina, disponible en: <http://www.redtextilargentina.com.ar/index.php/fibras/f-ennoblecimiento/212-insumos-para-el-ennoblecimiento-de-fibras/colorantes-textiles/185-colorantes-textiles> [Consultado el día 24 de julio de 2015]

Robinson T, McMullan G, Marchant R, Nigam P. (2001). "Remediation of dye in textile effluents: A critical review on current treatment technologies with proposed alternative". *Bioresearch Technology*. Vol. 77.

Rodríguez, S.; Bermúdez, R.; Serra, M.; Korouma, A. (2006). "Selección de cepas de *Pleurotus ostreatus* para la decoloración de efluentes industriales". *Revista Mexicana de Micología*. Vol 23.

Rojas (2011). "Estudios de la contaminación de los recursos hídricos en la cuenca del Rio San Pedro, previos a la construcción de una hidroeléctrica (P.H.Las Cruces) en Nayarit, México". [En línea] México, disponible en: [http://www.conanp.gob.mx/conenido\\_2/pdf/cedoc\\_tesis\\_2013/Rojas\\_Mayorquin\\_Citlalli\\_Micaela-Estudio\\_de\\_la\\_contaminacion.pdf](http://www.conanp.gob.mx/conenido_2/pdf/cedoc_tesis_2013/Rojas_Mayorquin_Citlalli_Micaela-Estudio_de_la_contaminacion.pdf) (Consultado el día 06 de Marzo del 2015)

Romero, J., (2004). "Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño". Colombia, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

SALUD.GOB (1993) "NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-038-SSA1-1993, Bienes y servicios. Colorantes Orgánicos Sintéticos. Especificaciones Sanitarias Generales" por Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química [En línea] Ciudad de México, disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/038ssa13.html> (Consultado el día 08 de Marzo del 2015)

Sánchez, J.; Rodríguez, J., (2015). "Fundamentos y aspectos microbiológicos, biorremediación" en *Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de minas* [En línea]. Asturias, disponible en: [http://ingenierosdeminas.org/docu/documentos/fundamentos\\_%20biorremediacion.pdf](http://ingenierosdeminas.org/docu/documentos/fundamentos_%20biorremediacion.pdf) [Consultado el día 25 de junio de 2015].

Sánchez, Verenise (2016). "Agua contaminada una amenaza latente en México". [En línea] México, disponible en: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/11179-agua-contaminada-una-amenaza-latente-en-mexico> [Consultado del día 15 de enero de 2017].

SCFI (2001). "NMX-AA-045-SCFI-2001 "Análisis de agua - determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba". [En línea] México, disponible en: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166781/NMX-AA-045-SCFI-2001.pdf> [Consultado el día 15 de enero de 2017]

Scott, C. A., N. I. Faruqui, and L. Raschid-Sally, ed. (2004). "Wastewater Use in Irrigated Agriculture: Confronting the Livelihood and Environmental Realities" in International Water Management Institute (IWMI) [en línea]. Canadá, disponible en: [http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Books/PDF/Wastewater\\_Use\\_in\\_Irrigated\\_Agriculture.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Books/PDF/Wastewater_Use_in_Irrigated_Agriculture.pdf) [Consultado el día 15 de abril de 2015].

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2013). "Agua". [En línea], México, disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap6\\_agua.pdf](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap6_agua.pdf). [Consultado el día 26 de diciembre de 2014]

SEMARNAT (2008). "El agua". [En línea], México, disponible en: [http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05\\_serie/yelmediambiente/4\\_agua\\_v08.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05_serie/yelmediambiente/4_agua_v08.pdf) (Consultado el día 07 de Marzo de 2015)

SEMARNAT (2012). "Informe de la situación ambiental del México. Compendio de Estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. Edición 2012". [En línea], México, disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/pdf/Informe\\_2012.pdf](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf) (Consultado el día 6 de marzo de 2015)

SEMARNAT, (2015). "Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales" en PROFEPA.gob.mx [en línea]. México, disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf> [Consultado el día 20 de junio de 2015].

SEMARNAT, (2015). "Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal" en Aguascalientes.gob.mx [en línea]. México, disponible en: <http://www.aguascalientes.gob.mx/PROESPA/pdf/NOM-SEMARNAT-002%20DESCARGA%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20AL%20ALCANTARILLADO.pdf> [Consultado el día 20 de junio de 2015].

Sette, R.; Jiménez, D. y F. de Lora (1990) "*Tratamiento de aguas residuales*, Segunda reimpresión", España, Editorial Reverté, S.A.

Singh, O.V., Jain, R. K. (2003). "Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil". *Applied and Microbiology Biotechnology*. 63: 128-135.

SINIA, (2015). "Reactor Anaeróbico" [en línea]. Chile, disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_31.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_31.pdf) [Consultado el día 12 de septiembre de 2015].

SSA (1993). "Norma Oficial Mexicana NOM-038-SSA1-1993. Bienes y servicios. colorantes orgánicos sintéticos. especificaciones sanitarias generales". [En línea] México, disponible en: <http://www.colpos.mx/bancodenormas/noficiales/NOM-038-SSA1-1993.PDF> [Consultado del día 15 de enero de 2017].

SSA (1994). "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". [En línea] México, disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html> [Consultado el día 15 de abril de 2017].

SSA (1995). "NORMA Oficial Mexicana NOM-130-SSA1-1995, Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias". [En línea] México, disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69546.pdf> [Consultado el día 15 de enero de 2017].

SSA (2002). "NORMA Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2002, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias". [En línea] México, disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/201ssa12.html> [Consultado el día 15 de enero de 2017]

SSA (2016). "Secretaría de Salud México". [En línea] México, disponible en: <http://gobierno.com.mx/secretaria-de-salud/> [Consultado del día 15 de abril de 2017].

Tejero, I. *et al.*, (2015). "Tema desinfección, cloración, ozonización" en *CERES*. [En línea] España, disponible en: [ftp://ceres.udc.es/Grado\\_TECIC/Cuarto\\_Curso/Ingenieria%20Ambiental/Desinfeccion/TEMA-desinfecci%C3%B3n-rev140225-ajb.pdf](ftp://ceres.udc.es/Grado_TECIC/Cuarto_Curso/Ingenieria%20Ambiental/Desinfeccion/TEMA-desinfecci%C3%B3n-rev140225-ajb.pdf) [Consultado el día 13 de mayo de 2015]

Thangavel, P., Subhram, C. V. (2004). "Phytoextraction - Role of hyperaccumulators in metal contaminated soils". *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B.* 70(I):109-130.

The Gazette of India. 1996. Ecomark criteria for textiles. Extraordinary, Part II-Section 3(i), No. 322, Oct. 8.

Torres K.; T. Zuluaga, (2009). "Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos". Tesis. Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Torres, Calderón (2009). "Fitorremediación de aguas residuales por hidroponía". [En línea] México, disponible en: [http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5721/JE\\_S%3C3%9AS%20TORRES%20CALDER%3C3%93N.pdf?sequence=1](http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5721/JE_S%3C3%9AS%20TORRES%20CALDER%3C3%93N.pdf?sequence=1). [Consultado el día 21 de noviembre de 2014]

Tratagua. (2012). "Tratamiento de aguas residuales domesticas a través de fitorremediación". [En línea], disponible en: <http://es.slideshare.net/NELSHON/tratamiento-de-aguas-residuales-fitorremediacion>. [Consultado el día 17 de noviembre de 2014]

UIA (2002). "La problemática del agua en México y el mundo". [En línea], México, disponible en: [http://www.uia.mx/uiainstitucional/medioamb/pdf/la\\_problematika\\_del\\_agua%20.pdf](http://www.uia.mx/uiainstitucional/medioamb/pdf/la_problematika_del_agua%20.pdf). [Consultado el día 29 de diciembre de 2014]

UNAD (2015) "Tema 4. Aguas residuales". En línea, Colombia, disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/Act\\_7\\_tema\\_de\\_ayuda.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/Act_7_tema_de_ayuda.pdf) (Consultado 13 de mayo de 2015)

UNAM. (2015). "2.8 Estudio microscópico de los microorganismos" [en línea]. México, disponible en: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/7fTinciones\\_27340.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/7fTinciones_27340.pdf) [Consultado el día 20 de diciembre de 2015].

UNESCO (2004). "La crisis mundial del agua". [En línea], disponible en: [http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/pdf/chap1\\_es.pdf](http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/pdf/chap1_es.pdf) [Consultado el día 6 de Marzo de 2015]

UNESCO (2010). "El agua en un mundo en cambio constante. El tercer informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo." [En línea], disponible en: [http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap\\_WWDR3\\_Facts\\_and\\_Figures\\_SP.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap_WWDR3_Facts_and_Figures_SP.pdf). [Consultado el día 28 de diciembre de 2014]

UNESCO. (2009). "Hechos y cifras". [En línea], disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/>. [Consultado el día 28 de diciembre de 2014]

United Nations Educational Scientific Cultural Organization (UNESCO) (2010) "El 3er Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos" [En línea]. Disponible en: [http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap\\_WWDR3\\_Facts\\_and\\_Figures\\_SP.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap_WWDR3_Facts_and_Figures_SP.pdf). [Consultado el día 24 de julio de 2015]

Valderrama, L., (1997). "Las plantas acuáticas: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en Colombia. Innovación y Ciencia, Vol VI-Nº2.

Valero, Alvarado (2006). "Aplicación tecnológica de las macrófitas a la depuración de aguas residuales con la ayuda de microorganismos". [En línea], Colombia disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7580/2/121012.pdf>. [Consultado el día 17 de noviembre de 2014]

Van Deuren, J., Wang, Z. y Ledbetter, J. 1997. Remediation technologies screening matrix and reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA. [En línea], disponible en: <https://www.epa.gov/remedytech> [Consultado el día 17 de noviembre de 2014]

Velasco, J. y T. Volke, (2007). "El composteo: alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México" en Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). [En línea]. México, disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetitas/381/volke.html> [Consultado el día 15 de marzo de 2015]

Walter, W y Beyer, H. (1987). "Manual de Química Orgánica" España, Editorial Reverté.

Walters, A.; Santillo, D. y P. Johnston, (2005). "Tratamientos textiles y sus repercusiones ambientales" en *Laboratorio de Investigación de Greenpeace, Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de Exeter*. [En línea]. Reino Unido, disponible en: <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/el-tratamiento-de-textiles-y-s.pdf> [Consultado el día 30 de abril de 2015]

Wang, J. (2006). "Tendencias mundiales en la industria textil". Tomado de Industria de productos textiles. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el trabajo. Coord. Ivester L. y Neefus J.

Weinhold, Bob (2013) "PCB No Obsoletos: Un segundo vistazo a los subproductos de la fabricación de pigmentos" en *Environmental Health Perspectives*; vol. 121, no. 3, marzo 2013, pp. 348-363, [En línea], disponible en: [http://bvs.insp.mx/rsp/articulos/articulo\\_e3.php?id=002826](http://bvs.insp.mx/rsp/articulos/articulo_e3.php?id=002826) [Consultado el día 17 de julio de 2015]

Wetzel, R. G. (1981). *Limnología*. Barcelona: Omega

Wingrove, A., & Caret, R. (1999). *Química Orgánica*. México: Oxford University Press.