



UNIVERSIDAD AUTOMA DEL ESTADO DE MEXICO
FACULTAD DE PLANEACION URBANA Y REGIONAL
LICENCIAURA EN CIENCIAS AMBIENTALES



TESIS
DEGRADACIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO EMPLEANDO UN
TRATAMIENTO ELECTROFENTON EN SISTEMA DE FLUJO CONTINUO

PRESENTA
JOSÉ ALFREDO CRUZ CÁRDENAS

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. en C.A EDUARDO CAMPOS MEDINA

TOLUCA; MEX; 03 DE NOV DE 2019

GLOSARIO

Electrodo: pieza de cierto metal que funciona como conductor que recibe cierta corriente eléctrica para hacer contacto en un parte no metálico de un circuito.

Amperaje: cantidad de corriente eléctrica.

In situ: expresión latina que significa en el lugar observado.

Espectrometría: técnica para medir la concentración de especies determinadas en cierta muestra.

Equipo hach: instrumento para la medición de Demanda Química de Oxígeno.

Aerobia: modalidad de metabolismo en que se necesita intervención del oxígeno.

Anaerobia: se desarrolla en ausencia de oxígeno.

Anóxica: ambientes que carece de oxígeno.

Electrofentón: tratamiento de oxidación avanzada donde se generan radicales libres obteniendo un medio electrocatalítico.

Sistema batch: proceso que induce la producción de cantidades finitas de determinado material en un medio controlado.

Biótico: conjunto de flora y fauna.

Abiótico: vocablo que expresa sin vida.

Color azo: grupo funcional que proporciona color.

Acuoso: pose característica o parecida al agua.

Catalizador: sustancia que favorece una reacción química si intervenir directamente en ella.

Analito: especie química cuyo contenido se desea conocer, cuantificar e identificable.

Cromóforo: región molecular donde la diferencia de energía entre dos orbitales cae dentro del rango de espectro visible.

Antropogénico: efectos producidos por actividades humanas.

Iónico: unión química entre átomos, donde uno de ellos transfiere un electrón a otro.

Ionización: conversión química donde se producen iones.

Iones: moléculas o átomos con carga eléctrica.

Metaloide: que tiene propiedades entre los metales y no metales.

Liófilo: comportamiento de toda molécula que tiene afinidad con los lípidos.

Trófico: conjunto de especies o de organismos de unos ecosistemas.

Xenobiotico: sustancia química que se encuentra dentro de un sistema en el que no se produce de manera natural.

Unidad hazen: unidad para medir el color en agua.

Bencenos: hidrocarburo líquido obtenido de la destilación del alquitrande hulla.

Alifático: adjetivo que se utiliza en química para aquellos compuestos orgánicos que disponen de una cadena abierta en su estructura molecular.

Color index: índice internacional del color.

Organoléptica: conjunto de características físicas que tiene la materia.

Agua meteórica: termino aplicado al agua que penetra por arriba en las rocas.

Coagulante: son sales metálicas que reaccionan con la alcalinidad del agua.

Alcalinidad: capacidad del agua para neutralizar ácidos.

Floculo: grumo de materia orgánica formado por sólidos en suspensión

Fluidización: proceso por el cual una corriente ascendente de un fluido se utiliza para suspender partículas.

Osmótica: movimiento de un disolvente a través de una membrana semipermeable.

Reacción radicalaria: cualquier reacción que involucra radicales libres.

Radical hidroxilo: Molécula formada por un átomo de hidrogeno y un átomo de oxigeno con un electrón libre.

Organoclorado: compuesto con un esqueleto de átomos de carbono

Oxidación: perdida de electrones por parte de una molécula.

Anódica: reacción de oxidación.

Catódica: reacción de reducción.

Estequiometria: cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactivos y productos en una reacción química.

Cavitación: fenómeno físico, mediante el cual un líquido, en determinadas condiciones pasa a estado gaseoso y unos instantes después pasa nuevamente a líquido.

Sonolisis: proceso donde se forman de radicales libres con alto grado de oxidación.

Pirolisis: descomposición química de materia orgánica causada por calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

Ruptura homolítica: se produce cuando cada átomo que se separa retiene un electrón de los dos que constituyen el enlace, formando radical libres.

Radical libre: son aquellos átomos que disponen de un electrón sin emparejar, esto le confiere inestabilidad y reactividad.

Fenoles: compuesto químico.

Eutrofización: acumulación de residuos orgánicos que causa proliferación de algas.

Lixiviado: líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido.

Percolación: paso lento de fluidos a través de materiales con cierto grado de porosidad.

Alginato: sustancia química elaborada a partir de algas.

Indol: prueba bioquímica aplicada a especies bacterianas para determinar su habilidad de romper ciertos enlaces.

Ánodo: electrodo en que pasa la corriente positiva hacia el electrolito.

Cátodo: electrodo en el cual entra la corriente positiva proveniente del electrolito.

Fotólisis: ruptura de enlaces químicos por causa de energía radiante.

Ácidos carboxílicos: compuestos químicos.

Voltaje: magnitud física para medir la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

Dilución: reducción de la concentración de una sustancia química en una disolución.

Bomba peristáltica: tipo de bomba hidráulica de desplazamiento para bombear una variedad de fluidos.

Resumen

Este trabajo experimental se realizó con la intención de desarrollar una propuesta de remoción de color de aguas residuales industriales. En este tipo de aguas se pueden encontrar sustancias químicas residuales que tienen un efecto directo sobre la calidad del agua.

El planteamiento de la investigación está orientado hacia ciencia básica con la finalidad de estudiar la remoción del color que proporciona el compuesto azul de metileno en la fase acuosa. Este compuesto fue seleccionado debido a su utilización en enormes cantidades en los sectores industrial y doméstico. Debido a estas grandes concentraciones del colorante sus efectos al ambiente son adversos.

El planteamiento propone construir un dispositivo en flujo continuo, es decir colocar los componentes del tratamiento electroquímico (electrofentón) en forma horizontal simulando la forma horizontal de las tuberías que se encuentran en la mayoría de las empresas industriales que conducen sus aguas residuales.

Los electrodos manipulados fueron de hierro, las soluciones sintéticas empleadas del colorante azul de metileno tuvieron las concentraciones de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mgL⁻¹. Estos electrodos se conectaron a una fuente de poder, la cual proporcionó el amperaje correspondiente para llevar a cabo las reacciones de mineralización del colorante. Posteriormente se agregaron volúmenes de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), con esto se generaron radicales libres que tuvieron la función de degradar el azul de metileno. Los tiempos de tratamiento fueron de 1, 2, 3, 4, 5 y 10 minutos, las variables de control que se consideraron fueron el color y la demanda química de oxígeno (DQO).

Los resultados finales mostraron que se alcanzó la remoción del color en las mencionadas soluciones, el porcentaje alcanzado fue del 100%. Durante esta degradación el proceso químico generó in situ especies muy reactivas que se recombinaron produciendo compuestos químicos muy diferentes al colorante original.

Esto se corroboró mediante los resultados experimentales generados de las técnicas de espectrofotometría de ultravioleta y el equipo Hach. Estos valores mostraron que, en función del tiempo del tratamiento, este comportamiento no fue el esperado en el planteamiento inicial, sin embargo, se concluyó que el colorante

fue degradado totalmente eliminando el color de las soluciones sintéticas utilizadas.

El tratamiento planteado en este trabajo de investigación no está contemplado en el contenido temático de las unidades de aprendizaje de la Licenciatura de Ciencias Ambientales de la Facultad de Planeación Urbana y Regional, por lo cual se espera que se tome como punto de referencia para las nuevas modificaciones de temáticas de la Licenciatura.

Introducción

El tema de la contaminación del agua es un problema que tiene grandes repercusiones negativas sobre este recurso natural no renovable. La causa de esto se encuentra en procesos de producción. Los residuos generados que normalmente son metales pesados, principios farmacéuticos, polímeros, aditivos y colorantes (azul de metileno) se vierten en los ríos que desembocan en grandes cuerpos e incluso llegan a los océanos.

El efecto adverso ambiental de estos residuos químicos que están presentes en la fase acuosa, es propiciar la transformación de las condiciones naturales aerobia y anaerobias.

Esta condición anóxica en el agua da pauta a la aparición de la liberación de gases tales como metano (CH_4) y compuestos de azufre (RSR') que a su vez son responsables del calentamiento global.

Debido a eso el hombre ha tratado de desarrollar varias alternativas de solución, como son los tratamientos biológicos, químicos, avanzados de oxidación, que buscan atenuar la carga de contaminantes químicos en las aguas residuales de las empresas industriales.

Es por ello que en este trabajo de investigación se plantea aplicar un tratamiento electroquímico denominado electrofenton, en el cual se plantea el diseño en flujo continuo. Esto es debido a que la mayoría de los tratamientos que se aplican con este tipo de método son del tipo batch a condiciones sumamente controladas.

El contenido de este estudio está definido en seis capítulos, en los tres primeros se toca el marco conceptual en el que se desarrollan los conceptos de contaminación del agua, efectos de la contaminación y métodos de tratamiento del agua residual. Asimismo, se muestra el marco referencial en donde se muestran algunas de las investigaciones realizadas por otros científicos, que con esto buscaron disminuir la concentración de contaminantes en el agua y por consiguiente abatir el grado de contaminación.

En los capítulos cuatro y cinco son el cuerpo de la investigación, ya que muestran la metodología planteada y los correspondientes resultados. Esto últimos exhiben los encuadres de cada fase que se realizó durante la etapa experimental. Finalmente, en el capítulo seis se exponen las conclusiones del trabajo realizado.

Índice	Pág.
Antecedentes.....	1
Planteamiento del Problema.....	4
Justificación.....	6
Hipótesis.....	7
Objetivos.....	7
Capítulo I Contaminación.....	8
1.1 Definición.....	9
1.1.1 Clasificación de contaminantes	9
1.2 Contaminantes del agua.....	11
1.3 Parámetros de la calidad del agua.....	12
1.4 Contaminantes del agua por colorantes.....	13
1.5 Contaminantes orgánicos (colorantes).....	13
1.5.1 Composición de colorantes.....	14
1.6 Efectos sobre la calidad del agua del azul de metileno.....	15
Capítulo II Tratamientos de aguas residuales.....	17
2.1 Tratamientos de aguas residuales.....	18
2.2 Tratamientos avanzados para degradar compuesto orgánicos	19
2.2.1. Ozonización	19
2.2.2 Procesos fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$).....	20
2.2.3 Oxidación electroquímica.....	20
2.2.4 Radiolisis y tratamientos con haces de electrones.....	21
2.2.5 Tratamientos fotoquímicos.....	21
2.2.6 Radiación UV/ H_2O_2	21
2.3 Métodos electroquímicos.....	22
Capítulo III electrofenton.....	24
3.1.- Tratamiento electrofenton.....	25
3.2 Investigaciones aplicando técnicas electroquímicas y de electrofenton	27
Capítulo IV Metodología.....	29
4.1 Diagrama de la metodología.....	30
4.1.1 Preparación de soluciones sintéticas del colorante.....	30
4.1.2 Construcción artesanal del dispositivo.....	31
4.1.3 Cuantificación de la demanda química de oxígeno (DQO).....	32

4.1.4 Color.....	32
4.1.5 Tratamiento Electrofenton.....	32
4.1.6 Determinaciones por espectrofotometría de ultravioleta.....	33
4.1.7 Cuantificación del demanda química de oxígeno y el color.....	33
4.1.8 Resultados y análisis.....	33
Capítulo IV resultados.....	34
5.1. Remoción de color de azul de metileno.....	35
5.2 Remoción de Color de las soluciones del colorante.....	40
5.3 Propuesta de reacciones de radicales libres.....	45
5.4 Cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	48
Capítulo VI Conclusiones.....	56

Índice de Figuras	Pág.
Figura 1. Estructura del colorante azul de metileno.....	15
Figura 2. Esquema de las principales especies de descomposición de ozono en agua pura iniciada por hidróxido.....	20
Figura 3. Proceso de electrofenton.....	25
Figura 4. Pasos de la Metodología utilizada en la investigación	30
Figura 5. a) y b). Dispositivo con electrodos.....	31
Figura 6. Equipo de Espectrofotometría de ultravioleta.....	33
Figura 7. Espectros de las soluciones sintéticas del colorante azul de metileno.....	35
Figura 8. Espectros de la solución de 10 mgL ⁻¹ del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.....	36
Figura 9. espectros de la solución de 20 mgL ⁻¹ del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.....	37
Figura 10. espectros de la solución de 30 mgL ⁻¹ del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.....	38
Figura 11. Espectros de la solución de 40 mgL ⁻¹ del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.....	39
Figura 12. Espectros de la solución de 50 mgL ⁻¹ del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.....	40
Figura 13 espectros de la solución de 60 mgL ⁻¹ del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.....	40
Figura 14 color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 10 mgL ⁻¹	41
Figura 15. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 10 mgL ⁻¹ 10 minutos de espera.....	42
Figura 16. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 30 mgL ⁻¹	42
Figura 17. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 30 mgL ⁻¹ a los 10 minutos de espera.....	43
Figura 18. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 30 mgL ⁻¹ a los 20 minutos de espera.....	43

Figura 19. Interacción del radical libre hidroxilo y la molécula del colorante.....	46
Figura 20. . Formación de radicales libres en las moléculas del colorante azul de metileno	47
Figura 21. Interacción de moléculas como radicales libres, formación de nuevos compuestos	47
Figura 22. Generación de nuevos compuestos orgánicos debido al ión del radical libre hidroxilo y la molécula del colorante y que pueden recombinarse	47
Figura 23. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 10 mgL ⁻¹	49
Figura 24. Estructura de nuevos compuestos formados por tratamiento electrofenton.....	50
Figura 25. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 10 mgL ⁻¹	51
Figura 26. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 20 mgL ⁻¹	52
Figura 27. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 30 mgL ⁻¹	52
Figura 28. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 50 mgL ⁻¹	53
Figura 29. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 60 mgL ⁻¹	53

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1. Integración de clasificación de contaminantes.....	10
Tabla 2. Parámetros de calidad de la calidad del agua.....	12
Tabla 3. Resultados de porcentajes de remoción del colorante.....	44
Tabla 4. Resultados de la DQO de las soluciones tratadas.....	48

Antecedentes

La contaminación del agua es un problema que afecta a escala a nivel mundial, sin respetar fronteras. En las últimas décadas se ha agravado hasta adquirir proporciones dramáticas tanto por su intensificación como por su extensión geográfica; esta situación ha venido deteriorando nuestras redes hidrológicas, así como innumerables lagos, presas y océanos, convertidos en grandes basureros sobre los que se descargan todo tipo de sustancia de desecho. El efecto directo de estos desechos es la creación de un desequilibrio en las condiciones bióticas (plantas y animales) y abióticas (medio físico y químico), originando un sinnúmero de alteraciones iguales o más graves. Se considera que todas las actividades en las que se generen bienes producen contaminantes se crean subproductos no deseados, estos residuos son la causa más importante de la pérdida de calidad del agua en todo el mundo (UNESCO, 2009).

Desde una perspectiva médica se dice que la contaminación del agua es el grado que adquiere hasta tener un cierto nivel de impurificación, la cual puede originar efectos adversos a la salud de un porcentaje representativo de personas durante períodos relativos de tiempo con ello se afirma que el agua está asociada a la transmisión de enfermedades que puede ser causada por ingestión directa o mediante la contaminación de los alimentos, por lo que su calidad está absolutamente relacionada con la calidad de vida de la población. Otra definición que se cita en el documento “El agua como asunto de seguridad nacional” (Velez, 2012) es donde considera que el agua está contaminada, cuando se ven alteradas sus propiedades químicas, físicas y biológicas, con lo que pierde su calidad de uso, por ejemplo, para consumo diario, utilización en las actividades domésticas, industriales y agrícolas.

Múgica (2014) define la contaminación del agua como “la adición de cualquier sustancia al agua, en cantidad suficiente que cause impactos directos en los seres humanos, en los animales, en la vegetación. (Múgica Álvarez, 2014).

Comparando las afirmaciones anteriores podemos concluir que la contaminación del agua es aquella donde se produce una alteración en su calidad es decir en sus propiedades ya sea química, biológica o física, contribuya a dificultar en uso final que se le dará a la misma.

Toledo (2002), expone que los problemas entorno a dicha calidad del agua son crecientes. Asimismo, se vinculan con la salud pública y la pobreza que padecen grandes sectores de la población humana. Organizaciones Internacionales como la Comisión de Desarrollo Sustentable de la ONU, señalan a la contaminación de las aguas como una de las principales causas de muerte de millones de seres humanos aproximadamente por año (Toledo, 2002).

Este escenario de contaminación del agua es uno de los principales problemas que se presenta en los acuíferos de México (Anon, 2014). Esto se debe a las actividades en el sector industrial de diversos giros que vierten sus desechos industriales a los cuerpos de agua. En esta investigación se consideró la problemática textil que vierte al ambiente colorantes, que son sustancias orgánicas fluorescentes o de color intenso que imparten color a una sustancia incolora, o bien, a un sustrato por medio de una absorción selectiva de luz (Jimenez, 2009).

Esto fue corroborado por Maldonado y Molina (2011), que señalaron que la fuerte coloración de las aguas residuales de las tintorerías propiciaron que los volúmenes de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en el agua, por lo que su presencia debe ser controlada (Maldonado Rogel & Molina Ayala, 2011).

La complejidad para resolver esta problemática ha llevado a la comunidad científica a desarrollar métodos del tipo electroquímico que remuevan este tipo de moléculas contaminantes como son:

- Meng-hui y colaboradores (2018) revisaron y analizaron el tratamiento de electrofenton para remover contaminantes disueltos en agua residual. Los resultados de estos análisis demostraron la eficacia de este tratamiento

para remover contaminantes en excelentes porcentajes de mineralización (Meng-hui , et al., 2018).

- Xiandan y colaboradores (2017) estudiaron el proceso bioelectrofenton con la finalidad de degradar un colorante azo en fase acuosa. Los resultados mostraron que la unión de la parte biológica con el electrofenton aumento su eficiencia, ya que el colorante fue mineralizado en 18 minutos (Xiaohu Li, et al., 2017).

- Labiadh y colaboradores (2015) aplicaron un tratamiento de electrofenton catalizado con pirita natural, con el objetivo de mineralizar un colorante azo (4-amino-3-hidroxi-2-p-tolylazo-naftaleno-1-acido sulfónico, AHPS), este proceso mostró que este compuesto es mineralizado en su totalidad en un lapso de ocho horas (Labiadh, et al., 2015).

- Ghanbari y Moradi (2015) realizaron una comparación de variantes de un tratamiento electroquímico. El que mostro los mejores de resultados de remoción del colorante disuelto en la fase acuosa fue la del electrofenton (Ghanbari & Moradi, 2015).

Este trabajo de investigación se encamino al tratamiento del electrofenton, con la finalidad de generar resultados experimentales, que abran una línea de investigación para la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la UAEM.

Planteamiento del problema

La contaminación del agua es la adición de cualquier sustancia a esta en cantidad suficiente para adquirir un grado de impureza que afecta a la calidad, en otras palabras, que cause impactos directos en los seres humanos, en los animales y en la vegetación. (Múgica Álvarez, 2014).

Una clasificación general de estos contaminantes químicos puede ser de dos tipos: a) orgánicos y b) inorgánicos. Las primeras sustancias están constituidas como su elemento base el carbono, entre estas tenemos al petróleo, la gasolina, los plásticos, los plaguicidas, los colorantes. los solventes y detergentes. El otro tipo de tóxicos se refieren a los ácidos, las sales y compuestos de metales tóxicos (como el mercurio, plomo, cadmio, cromo, estaño, etc). Todos estos analitos al concentrarse en niveles altos de sólidos disueltos pueden degradar la calidad hasta el punto de que el agua se vuelva no potable, por lo tanto, dañara la vida acuática, e incluso se registra que llega a afectar el sector agrícola y acelerar la corrosión de maquinaria donde se encuentre el uso del agua. Las fuentes principales son las industrias (Centro de Informacion y Comunicacion Ambiental de NorteAmerica, 2014).

Todas las sustancias antes mencionadas son incorporadas al ambiente, pero en este trabajo de investigación se orienta hacia los colorantes textiles (de tipo orgánico). Estos pigmentos tienen efectos nocivos en el hombre, la presencia de colorantes en las aguas residuales representa un problema ambiental ya que se diseñan para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana (Martínez, 2007).

Además de las derivaciones negativas de estas sustancias un indicador que toman como punto de referencia las dependencias gubernamentales en México es el color. La coloración del agua residual es señal a primera vista para establecer que hay presencia de contaminantes disueltos en ella. Por lo cual para las empresas que presentan dicha problemática es vital remover el color de sus aguas.

Debido a estos puntos negativos que presentan estos colorantes, la comunidad científica ha desarrollado propuestas que proponen degradar el colorante por diferentes tipos de tratamiento, como son: ozonización, fotocátalisis, absorción, intercambio iónico, químico, adsorción (Moreira, 2006).

Todas estas investigaciones reportadas en revistas científicas se han orientado hacia este tipo de procesos de remoción. Sin embargo, la implementación y eficacia de estas propuestas han sido tema de debate.

Otra alternativa que ha mostrado excelentes porcentajes de remoción de sustancias orgánicas es la técnica de electrofenton. Ejemplo de la virtud de este tratamiento fue el estudio realizado para la degradación del paracetamol que empleando este procedimiento se alcanzó una eficiencia del 100% (Trovó, et al., 2012).

Sin embargo, casi en todas estas investigaciones realizadas en esta temática han utilizado un sistema batch. Este dispositivo utilizado fue un reactor de tipo artesanal (como recipiente) diseñado para tal propósito a condiciones controladas. Los resultados como se citó previamente han sido óptimos. Sin embargo, son pocas las propuestas que han desarrollado el tratamiento en flujo continuo y normalmente de forma vertical.

Por esta razón en esta investigación se propone un tratamiento electrofenton con la variante de ser horizontal simulando la posición de las tuberías que tienen en las industrias de este tipo. De manera exploratoria se seleccionó al colorante azul de metileno, como analito de estudio. Con este trabajo se pretende exponer los resultados generados como un punto de referencia para otras investigaciones que tengan el mismo objetivo.

Justificación

Uno de los principales problemas que enfrenta la humanidad es la contaminación que se ha generado, a las actividades que realiza. El recurso del agua es el que ha tenido una mayor afectación hasta llegar a niveles en los que el agua ya no puede depurarse por cuenta propia.

De todos los contaminantes inorgánicos y orgánicos, el que más ha llamado el interés de los científicos es el de los colorantes. Este residuo es empleado en el teñido de mercancías diversas de empresas industriales de diversos giros. Se ha estimado que entre el 10-15% de los colorantes empleados en estas industrias son vertidos a sus aguas residuales. Estas sustancias químicas contienen los grupos cromóforos que son tóxicos, los cuales, al acumularse en lagos y ríos, provocan disminución en la luminosidad de las aguas y en consecuencia inducen a la disminución de la actividad fotosintética, lo cual produce a su vez una disminución en el contenido de oxígeno disponible en el agua (Suárez, 2011).

Debido a que las actividades antropogénicas han causado grandes impactos ambientales y que el número de zonas industriales en todo el país va incrementándose de manera paulatina, es importante generar propuestas de tratamiento de remoción de estas sustancias (colorantes) en las aguas residuales industriales. Los tratamientos aplicados en dicha remoción son variados desde el tradicional químico hasta la oxidación avanzada (Jiahao, et al., 2018).

Sin embargo, estos tratamientos en cierta manera resultan ser excesivamente costosos en su implementación y arranque en funcionamiento. Por esta razón en este trabajo de investigación se planteó la propuesta de desarrollar el tratamiento de electrofenton en flujo continuo en forma horizontal, implementándolo de manera sencilla y artesanal. Los resultados generados de esta investigación servirán como punto de referencia para otras posibles investigaciones que se desarrollen orientadas a este rubro de tratamiento de aguas residuales.

Hipótesis

Mediante el método electrofenton en flujo continuo se alcanzará el cien por ciento de eficiencia de remoción del colorante azul de metileno disuelto en fase acuosa en tiempos de tratamiento cortos.

Objetivos

Objetivo general:

Diseñar un modelo de remoción del colorante azul de metileno a través del empleo de un sistema electrofenton simulando un flujo que permita alcanzar un 100% de eficiencia de mineralización de esta sustancia.

Objetivos específicos:

- Proponer la utilización de un sistema de tratamiento de electrofenton en flujo continuo como un sistema de remoción en las descargar residuales textiles.
 - Aplicar a soluciones sintéticas de colorante azul de metileno el método de tratamiento planteado, generando con esto los resultados de remoción del colorante.
 - Monitorear los porcentajes de remoción del colorante, analizando los resultados de las variables de calidad del agua, color y demanda química de oxígeno.
 - Determinar si la eficiencia de este tratamiento adecuado para escalarse a nivel industrial para el tratamiento de aguas residuales.

CAPITULO I

CONTAMINACIÓN

1. CONTAMINACION

1.1 Definición

El término de contaminación tiene varias interpretaciones, las cuales son citadas por varios autores y dependencias gubernamentales, ejemplo de esto tenemos:

a) Se entiende como contaminación cuando elementos o sustancias entran en contacto con un entorno que en condiciones naturales no debería presentarse en él y que afecta el equilibrio del ecosistema. Los agentes contaminantes pueden ser físicos, químicos y biológicos los cuales perjudican medios como el agua, el suelo o el aire. Cuando estos agentes externos se presentan en concentraciones muy elevadas, alteran las condiciones de los organismos que habitan en estos nichos (Contaminacion ambiental.net, 2018).

b) De acuerdo a lo señalado por SEMARNAT (2018) la define como la presencia de materia cuya naturaleza, ubicación o cantidad produce efectos ambientales que son indeseables. Es decir, es la alteración hecha o inducida por acciones antropogénicas a la integridad física, biológica, química, y radiológica del medio ambiente (SEMARNAT, 2018).

De estas dos definiciones tiene como punto en común la presencia de sustancias en el ambiente. Asimismo, estas son incorporadas por las actividades propias del hombre. Cabe señalar que estos compuestos contaminantes pueden presentarse en forma de partículas sólidas, gotas líquidas, gases o incluso combinadas (Ramos, 1982).

1.1.1. Clasificación de Contaminantes

Diversos autores clasifican a los contaminantes, ya sea por su naturaleza química (pueden ser orgánicos e inorgánico) como por su tipo de fuente (primarios o secundarios). A manera de integración de estos tipos de clasificación se muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Integración de clasificación de contaminantes

Contaminante	Fuente/ Ejemplos	Naturaleza del contaminante
Primarios	Proceso Natural	En ambos casos se generan:
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erupción Volcánica ▪ Incendios 	<p>Inorgánico. Sales, Metales disueltos en gases y lava del volcán. Gases tales como SOx, NOx.</p> <p>Orgánicos. CO₂, CO, CH₄</p>
	Proceso Artificial	En ambos casos se generan:
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fuentes Móviles (gases de coches, aviones, camiones) ▪ Fuentes Fijas (Gases residuales de industrias) 	<p>Inorgánicos. Metales como Pb, Cr, Zn, As. Gases como SOx, NOx.</p> <p>Orgánicos. CO₂, CH₄, CFC</p>
Secundarios	Procesos de Interacción	Por cada una de las interacciones
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Naturaleza. Lagos, Ganado Bovino, descomposición materia orgánica. ▪ Procesos Antrópicos. Lluvia ácida. ▪ Smog fotoquímico. ▪ Contaminación Biológica ▪ Residuos disueltos en agua. 	<p>Orgánicos. Producción de CH₄.</p> <p>Inorgánicos. Gases de industrias como SOx, NOx, que se combinan con agua de la atmosfera.</p> <p>Inorgánico. Interacción de óxidos de nitrógeno con la radiación y descomposición del compuesto y formación del smog.</p> <p>Inorgánicos. Los nitratos por escorrentía pueden llegar al mar y aumenta el alimento y esto lleva a la proliferación de especies de algas acuáticas.</p> <p>Inorgánicos. Metales disueltos en el agua y son retenidos por los animales acuáticos en sus cuerpos.</p> <p>Orgánicos. Compuestos a base de carbono, son vertidos al agua y aumenta la materia orgánica que da pauta a la eutrofización</p>

Fuente: Elaboración propia del autor, 2019

Como se puede observar en la Tabla se muestran los contaminantes primarios, que son aquellos agentes contaminantes emitidos directamente de un proceso natural (cenizas de una erupción volcánica) (Concepto.de, 2019).

Asimismo, pueden ser de un proceso artificial que se generan de actividades antrópicas de fuentes móviles o fijas (CO₂ generado de vehículos, SO_x, NO_x de gases emitidos de las industrias).

A su vez de estos contaminantes pueden situarse en el tipo de contaminantes de acuerdo a su naturaleza orgánica como inorgánica. Ejemplos de estos compuestos se señalan en la Tabla 1 como SO_x, NO_x, CH₄, compuesto con base al elemento de carbono.

En cuanto a los contaminantes secundarios estos generan dentro del ambiente debido a su interacción directa con algunos contaminantes primarios (Envira IOT, 2019). En la Tabla 1 se mostró el tipo de interacciones que se presentan y que van a generar diversas sustancias que también de acuerdo a su estructura química pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos.

1.2 Contaminación del agua

La contaminación del agua es un fenómeno que se presenta en la sociedad tanto antigua como la moderna. Esto debido a las sustancias que el hombre vierte a los cuerpos de agua.

Esta contaminación afecta la calidad de agua, en varios parámetros fisicoquímicos, que varios documentos reportados por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) los consideran como indicadores de desempeño ambiental (SEMARNAT, 2011).

Dependiendo del origen de las sustancias que se vierten en el agua, se consultan los parámetros a evaluar en dicha agua contaminada. Por ejemplo, si las sustancias incorporadas a la fase acuosa se deben de considerar las variables de pH, grasas y aceites, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total, Fósforo Total, Metales (As, Cd, CN, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn) (CONAGUA, 2009).

La presencia de estas sustancias vertidas a los cuerpos de agua tiene efectos adversos o tóxicos sobre los recursos vivos, constituyendo un peligro para la

salud humana, así como obstaculizando las actividades marítimas en esta se considera la pesca, dichas actividades terminaran alterando la calidad del agua y disminuyendo los valores estéticos y de recreación (Arrazcaeta, 2002)

1.3 *Parámetros de calidad del agua*

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) desarrolló un sistema estimativo de calidad del agua que requirió la medición de los parámetros de contaminación del agua señalados de manera general en el punto 1.2

Este sistema se denominó Índice de Calidad del Agua (ICA) y es un sistema cualitativo que permite hacer comparaciones de niveles de contaminación en diferentes áreas (CONAGUA, 2010). Éste índice consideró 18 parámetros para su cálculo con distintos pesos relativos (W_i), que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de Calidad del Agua

Parámetro	Peso (W_i)	Parámetro	Peso (W_i)
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5.0	Nitrógeno en nitratos	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

Fuente: Compendio estadístico ambiental SEMARNAT 2010

De esta forma, los parámetros están señalados en las normas oficiales mexicanas: a) NOM-001-SEMARNAT-1996 (Los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales), b) la NOM-002-SEMARNAT-1996 (límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal) y c) NOM-003-SEMARNAT-1997 (límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público) (CONAGUA, 2016).

Las aplicaciones de estas normas estarán en función del tipo de origen (doméstico ó industrial) que tengan las aguas residuales, pero sobre todo de la fuente que las está generando, ya que el tipo de sustancias vertidas en el agua difieren de una hogar común y corriente a una empresa industrial que maneja varios insumos utilizados en su producción.

1.4. Contaminación del agua por colorantes

Como se ha mencionado previamente la contaminación del agua se ha incrementado alarmantemente debido a las labores del hombre, ya sea domésticas o industriales. En estos dos escenarios las sustancias que normalmente se citan de manera muy general (sin tomar en cuenta una clasificación exacta) en noticias de prensa o en reportes académicos son dos de dos tipos: a) Metales y b) compuestos orgánicos.

En este trabajo de investigación se seleccionó un compuesto orgánico que se ubica dentro de los llamados colorantes. Estos compuestos tienen como característica principal de causar efectos negativos sobre los organismos acuáticos (Clemente et al., 2013).

1.5 Contaminantes orgánicos (colorantes)

Debido a su excesiva producción en los últimos años, muchos países desarrollados se encuentran enfrentando serios retos de contaminación, debido a que sus cuerpos de agua están altamente polucionados por estos productos

que su uso es amplio en diversos giros de la rama industrial como es la textil, pinturas, papel y manufacturación de pulpa, teñimiento de ropa, tratamiento de pieles e imprentas (Zafar, et al., 2018).

Esta problemática la señalo Figueroa (2012) donde señalo que la industria textil es la mayor responsable de la generación de efluentes con pigmentos sintéticos. Ya que se reportó una producción anual a nivel global de 700,000 toneladas, de esta cantidad hay un estimado de 10,000 colorantes diferentes y pigmentos. Y de estos hay cerca del 10% de estos puede encontrarse en aguas residuales (Figueroa, 2012).

El efecto adverso de estos colorantes la explicaron Moreno y colaboradores (2012) en una investigación, donde señalan que la presencia de colorantes en los caudales no solo impacta de manera estética el ambiente, sino que causa una distorsión en los procesos fotosintéticos debido a la reducción en la penetración de la radiación solar. Esto trae como consecuencia una imposible renovación en la calidad del agua y, por ende, una afectación a organismos de diferentes niveles tróficos. Adicionalmente, se menciona que algunos de estos compuestos son de carácter tóxico, mutagénico y cancerígeno. Esto último debido a los enlaces Azo de estos compuestos (denominados Xenobióticos) que poseen en su estructura química (Moreno, et al., 2012).

En este sentido, el efecto negativo de los colorantes fue expuesto por Ríos Donato (2018), que comento que los colorantes disueltos en aguas residuales representan un serio problema ya que su efecto se manifiesta en el cuerpo receptor final, al impedir el libre paso de la luz que contribuye con los procesos acuáticos. Aunado a lo anterior estas sustancias también dañan el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Ríos Donato, 2018)

1.5.1 *Composición de Colorantes*

Como se mencionó en el punto anterior los colorantes poseen una estructura denominada como enlaces Azo, que se pertenecen a los grupos cromóforos que son los responsables de otorgar color a las soluciones acuosas.

Esta estructura de cromóforos poseen grupos químicos funcionales como son los azo (-N=N-), carbonilo (C=O), metilo (-CH₃), nitro (-NO₃) y grupos quinoides. Estas estructuras generan el color por medio de la radiación absorbiendo la energía de la luz en sus enlaces, posteriormente la emiten dando al espectro de radiación el color característico de cada grupo funcional (Mollah, et al., 2010).

Con respecto al colorante azul de metileno (analito seleccionado en esta investigación) Moreno y colaboradores (2012) señalaron que el azul de metileno (Figura 1) es un colorante que se utiliza comúnmente en la industria textil debido a las características de alta solubilidad, brillo y resistencia. No es considerado tóxico, pero su presencia por períodos largos de tiempo puede ocasionar diversos efectos nocivos para la población humana y algunos animales. Su toxicología señala que, tras su inhalación puede causar dificultad y agitación en la respiración, mientras su ingestión causa náuseas, vómitos, confusión mental, entre otras. (Moreno, et al., 2012).

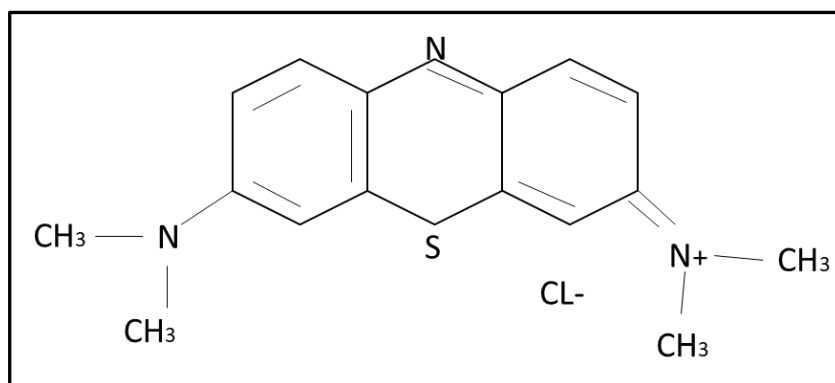


Figura 1. Estructura del Colorante Azul de Metileno

Fuente: Elaboración propia

1.6 Efectos sobre la calidad del agua del azul de metileno

Como se ha señalado las características del colorante le otorgan una gran demanda por la industria, sin embargo, su presencia en fase acuosa genera varios problemas en el agua (Albis A, et al., 2017).

Estos problemas ambientales se deben principalmente a la composición química de los átomos constituyentes de los colorantes. Esta característica les da la propiedad de estos ya que son sumamente resistentes a la biodegradación y a los tratamientos de agua acostumbrados. Desgraciadamente estas técnicas usuales propician un incremento en las posibilidades de que estos colorantes, sufran transformaciones a compuestos más tóxicos (Cortazar Martínez, et al., s/f).

Rodríguez y Colaboradores (2006), señalaron que la presencia de colorantes en concentraciones medias en cuerpos de agua, propician un desequilibrio en los sólidos suspendidos, en la carga iónica, en la toxicidad, en la concentración de oxígeno disuelto y en el color de la fase acuosa (Rodríguez , et al., 2006)

Otro efecto negativo lo reporto Kwon (2008), en una investigación que señala la ratificación de la actividad mutagénica del colorante en las especies localizadas de un río cercano a un área industrial textil. Este efecto tóxico se reflejó en la disminución de las proteínas en el hígado y testículos de ratas, encontrando cambios en el contenido total de sus lípidos y colesterol (Citado en el trabajo de Kwon *et al.* (2008) (Olivares, 2015)).

Para el colorante azul de metileno, es un colorante fabricado por el hombre posee las características de ser inerte y resistente de mineralizar con los tratamientos biológicos de las plantas de tratamiento. Al ser vertido fuera de estos métodos aplicados, se ha detectado que al entrar al ambiente suele acumularse e incrementar su concentración en los distintos hábitats naturales (Bautista, 2011)

Debido a esta problemática, la eliminación de los colorantes en efluentes representa un desafío para los procesos de tratamiento en aguas residuales (Cartazar, 2011).

CAPITULO II

TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

El proceso de tratamiento de aguas residuales se compone en una serie de diferentes procesos los cuales tienen como fin el de remover los contaminantes que estén agregados en el agua efluente. Las técnicas para remover estas sustancias, pueden ser de diversos tipos acorde a las características del cuerpo de agua contaminado (CONAGUA, 2016).

2.1 Tratamientos del Agua Residual

Como se señaló previamente los métodos de remoción varían de acuerdo al contenido de sustancias disueltas en el efluente de aguas residuales. De manera general se exponen algunos de ellos:

- a) *Tratamiento Primario*. El objetivo final de este paso es remover la turbidez, las partículas sólidas y los materiales flotantes. Esta fase es únicamente mecánica. (Montoya, 1967). Para realizar esta separación se han diseñado el cribado, las mallas, la desarenación, tanques desnatadoras, tanques de sedimentación, clarificadores primarios (Fernandez-Alba, 2006). En este último se emplean agentes coagulantes como son el FeCl_3 o AlCl_3 (Bermúdez, et al., 2009).
- b) *Tratamiento Secundario*. Está diseñado para descomponer, evacuar y eliminar la materia orgánica de las aguas residuales mediante un proceso de oxidación de carácter biológico con la utilización de microorganismos para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable (González, 2018). Los equipos diseñados para este proceso se denominan como filtros de arena intermitentes, filtros percoladores, cilindros rotatorios biológicos, lechos fluidizados, tanques de lodos activos, estanques de estabilización u oxidación y sistemas de digestión de lodos (Iagua, 2019).
- c) *Tratamiento terciario*. Este método es utilizado para eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias no eliminadas en los tratamientos anteriores, tales como los nutrientes, fósforo y nitrógeno (Vaca, 2016). Este tratamiento consiste de un proceso físico-químico utilizando la filtración, precipitación y la cloración para reducir los niveles

de nutrientes inorgánicos de manera drástica. Algunos de estos procesos utilizados son el intercambio iónico, la adsorción, la micro y ultrafiltración, la desinfección, la estabilización química (Belzona, 2016).

2.2. Tratamientos avanzados para degradar compuestos orgánicos

Este tipo de tratamientos tiene la función primordial de mineralizar los compuestos orgánicos que han sido vertidos en el agua, como son los polímeros, los hidrocarburos, los principios activos de las medicinas, solventes Eddy (Citado en Leidy, 2017) y sobre todo los colorantes orgánicos como lo es el analito de este trabajo de investigación que es el Azul de Metileno.

Este tipo de técnicas han mostrado grandes porcentajes de remoción y a continuación se mencionan:

2.2.1. Ozonización.

El ozono (O_3) es un eficaz oxidante y desinfectante, por lo cual cuando se utiliza en el tratamiento de aguas residuales oxida materiales encontrados disueltos en dichos efluentes. El efecto se refleja en la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5). (HIDRITEC, 2016).



Donde "S" es cualquier sustrato orgánico disuelto en la fase acuosa, susceptible de oxidar. Este proceso es considerado como un pretratamiento de calidad para su utilización en procesos biológicos, debido a su propiedad ya mencionada y a su eficiencia bactericida (Forero, et al., 2005). En la Figura 2 se muestra un esquema de las principales especies de la descomposición de ozono en agua pura iniciada por iones hidróxido (como se cita Glaze et al., 1987). (Domènech, et al., 2004)

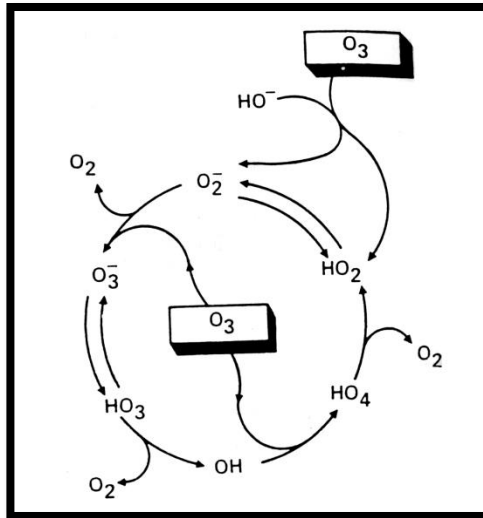


Fig 2. Esquema de las principales especies de la descomposición de ozono en agua pura iniciada por iones hidróxido (Domènech, et al., 2004)

2.2.2. Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2)

La técnica de oxidación por reactivo de fenton se basa en que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al combinarse con iones ferrosos (Fe^{+2}) producen los radicales libres hidroxilo ($OH\bullet$) y per hidroxilo ($HO_2\bullet$), los cuales comienzan una reacción de oxidación en cadena para eliminar la materia con característica oxidable (Rubio. 2014).

2.2.3. Oxidación electroquímica

Es una técnica alternativa que puede ser utilizada para la descontaminación de aguas residuales. La oxidación electroquímica cuenta con diversas ventajas como lo es la versatilidad, una compatibilidad con el ambiente, eficiencia al emplear energía, facilidad de automatización, y una positiva relación costo/beneficio. La meta a obtener es la total oxidación de los elementos orgánicos a CO_2 , o bien la transformación de los agentes tóxicos a compuestos biocompatibles. Este tratamiento consiste en suministrar corriente eléctrica (2-20 Amper) sobre dos electrodos sumergidos en agua, lo que produce reacciones químicas primarias, generando $HO\bullet$, (se muestran en la ecuaciones 2 y 3) que oxida la materia orgánica:



2.2.4. Radiólisis y tratamiento con haces de electrones

Estos procesos consisten en la generación de electrones altamente reactivos sobre un medio acuático a tratar, los iones radicales y radicales neutros son expuestos a haces de partículas másicas u ondas electromagnéticas cargadas de un grado alto de energía. Esto les confiere una alta capacidad para romper las estructuras químicas de los contaminantes disueltos en fase acuosa. La desventaja de emplear esta técnica es que requiere gran consumo eléctrico, su efectividad se ve mermada en términos económicos si es aplicada en cuerpos con altas cargas de contaminantes (Jardim, 2004).

2.2.5. *Tratamientos fotoquímicos*

Se basan en la aplicación de radiación solo sobre un foto-catalizador, es decir, fusiona un sistema sensible a los fotones y que una vez que este se foto-estimula se consigue catalizar una reacción química, en otros términos una degradación de agentes contaminante (Sarria, 2018).

2.2.6. *Radiación UV/H₂O₂*

Básicamente esta técnica utiliza la radiación de ultravioleta (uv), la cual es irradiada a una solución que tiene disuelto el H₂O₂, esto lleva a la generación de radicales libres con un enorme poder de oxidación. El uso de este tipo de tratamiento proporciona grandes ventajas: a) el oxidante es comercialmente fácil de adquirir, cuenta con características térmicas estables con lo que puede ser almacenado, (con las recomendaciones necesarias), b) Debido a que posee solubilidad infinita en agua, no se encuentra problemas de transferencia de masa relacionado con gases, como puede ser el ozono (Alonso, 2013).

2.3. Métodos electroquímicos

Este método consiste en hacer pasar una corriente de energía eléctrica a través de un flujo de agua (que obligatoriamente ha de contener un electrolito el cual debe estar disuelto en la fase acuosa), provocando así reacciones de oxidación-reducción en los electrodos del cátodo y del ánodo. Debido a que la técnica utiliza, se establece que es un agente útil para la descontaminación ambiental. Los procesos que ocurren en el cátodo y ánodo se muestran a continuación (Fernandez & Rodríguez, 2017).

- *La oxidación en ánodo:* durante este proceso se puede conseguir la oxidación de los compuestos a remover, ya sean orgánicos o inorgánicos. Esta oxidación se obtiene directamente por una transferencia de electrones localizados en la superficie del ánodo o ya sea por la generación de un agente oxidante *in-situ* (catalizador).
- *La reducción en cátodo:* su utilidad principal está en la posibilidad reducir la presencia de metales tóxicos. Con base en este proceso ha sido utilizado en diversas situaciones, desde la reducción de metales con carga catiónica con varios miles de ppm's de concentración hasta valores incluso por debajo de la ppm.

Las variantes a tener en cuenta para este proceso son fundamentales para el aplicar dicho tratamiento. Esos son el diseño del reactor o medio donde se realizará, el material son los electrodos, y la cantidad de energía que se empleara (diferencia de potencial y/o corriente de trabajo). (Remtavares, 2017)

Existen diversas variantes de tratamientos electroquímicos, normalmente se basan en los materiales que constituyen a los electrodos, el diseño del reactor, electrolito a utilizar y el pH como variable de control. Un ejemplo de esto anterior es la *electrocoagulación* (EC) se desarrolló en un medio in situ.

Esta variante facilita la formación de agentes coagulantes se llevó a través de una corrosión de ánodos lograda por medio de la aplicación de una corriente,

con un tiempo de electrólisis prolongado. El funcionamiento de EC depende altamente de la química del medio acuoso que se utilice y de la conductividad que tenga (Yavuz, et al., 2010).

Investigadores como Keerthi (Citado en Neoh, 2015) mezcló el tratamiento de electrocoagulación con un MBR (bioreactor de membrana). Esta integración actuó de mejor manera en la reducción de desechos, removiendo la DQO y el metal en aguas residuales provenientes del sector industrial de pieles (Neoh, et al., 2015).

Capitulo III

Tratamiento Electrofenton

3.1.- Tratamiento Electrofentón

Para este tratamiento el uso de peróxido de hidrogeno H_2O_2 es esencial debido a que es considerado una sustancia amigable con el medio ambiente, debido a que no deja residuos peligrosos como sucede con otros oxidantes (Panizza & Cerisola, 2008).

El proceso de electrofentón ha tenido avances significativos debido a su eficiencia de la mineralización de compuestos en aguas residuales, bajos costos operacionales y carece de formación de contaminantes secundarios (lodos residuales). Su principio teórico está basado en la generación de radicales libres hidroxilo ($OH\bullet$) generado como se mencionó por una reacción de electro-generación de H_2O_2 con Fe^{2+} (Hamidreza Pourzamani, et al., 2018).

Al comenzar el proceso, este se caracteriza por la continua producción de H_2O_2 la superficie de cátodo destruye los contaminantes en un corto tiempo, así como la continua regeneración de Fe^{3+} a Fe^{2+} . Desafortunadamente estas ventajas solo pueden ser logradas en condiciones acidas lo cual daña los electrodos incrementando con ello el costo de este tratamiento (Ulucan & Kurt, 2015). Los pasos que se realizan en esta técnica, así como los elementos que participan se muestran en la Figura 3.

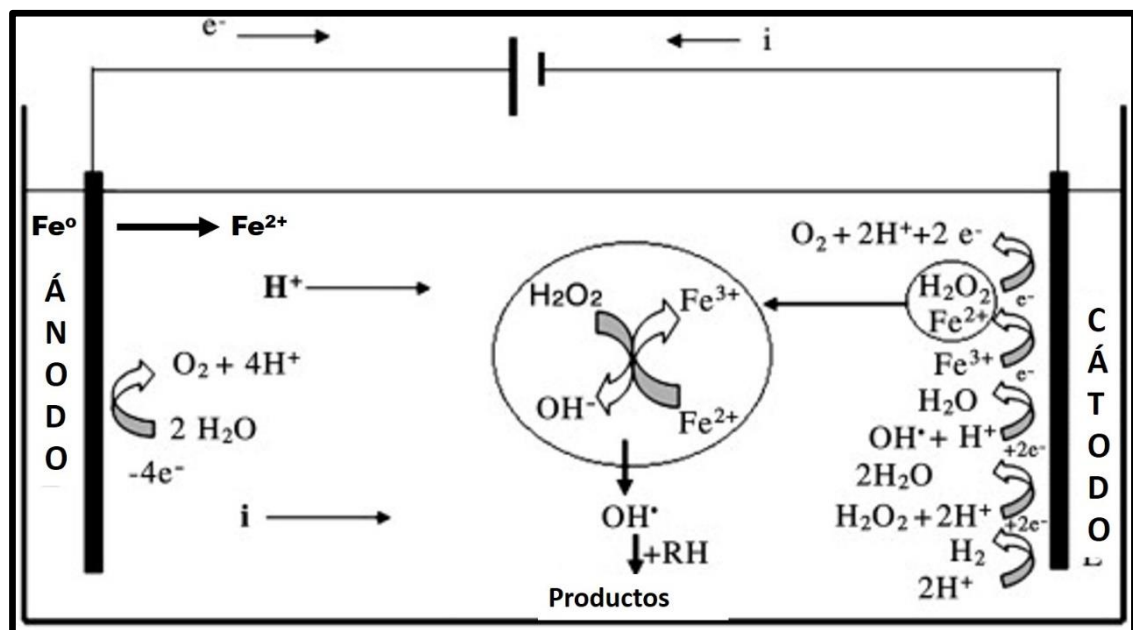


Fig. 3. Proceso de electrofenton Fuente: (P.V.Nidheesh, 2012)

La descripción de los procesos que ocurren en este dispositivo son los siguientes:

- a. *Ánodo.* – Con el voltaje que se aplica a los dos electrodos, en el ánodo que está constituido de hierro (Fe^0), se lleva a cabo una “oxidación” del elemento, liberando el ion ferroso (Fe^{2+}) a la solución.
- b. *Cátodo.* - Se observan varias reacciones de “reducción”, las cuales se observa la reducción del ion hidrógeno (2H^+) a hidrógeno molecular (H_2). Este reacciona con el peróxido de hidrogeno (H_2O_2) disuelto, generando dos moléculas de agua, las cuales sufrirían de una reducción causada por la densidad de corriente generando H_2 y un radical libre $\bullet\text{OH}$ generando H_2O .
- c. *Solución.* - En esta fase acuosa se observan varios procesos químicos que son:
 - El Fe^{3+} presente se regenera a Fe^{2+} el cual reaccionara con H_2O_2 .
 - Con esta reacción se produce el radical libre hidroxilo ($\text{OH}\bullet$)
 - El radical ($\text{OH}\bullet$) reaccionara con el compuesto orgánico disuelto en fase acuosa (RH)
 - Se generan O_2 , H_2 y dos electrones libres

De este proceso existen otra variante que es la *Foto Electro-Fenton (FEF)*, este proceso consiste en acelerar la descomposición de los componentes orgánicos por medio de radicación con luz ultravioleta. El ion férrico (Fe^{3+}) es reducido a iones ferrosos (Fe^{2+}) por foto-reducción y por reducción en el cátodo. La aceleración en la degradación de compuestos orgánicos en el FEF es llevado a cabo en dos principales caminos: 1) la fotólisis de Fe^{3+} con los compuestos oxidados derivados, obteniendo ácidos carboxílicos, comportándose como agentes foto-activos en presencia de iones de Fe los cuales someten las reacciones descarboxílicas (Dapeng, 2009), y 2) el aumento en la regeneración del Fe^{2+} por la foto-reducción de iones de Fe^{3+} . Este proceso se representa con la siguiente ecuación (4) (Nivya, et al., 2016) ∴



3.2.- Investigaciones aplicando técnicas electroquímicas y de electrofenton

Debido a varias exploraciones científicas y resultados parciales reportados, en los cuales la eficiencia ha sido prometedora, se han generado una gran diversidad de variantes en este tipo de tratamientos electrofenton. Ejemplo de estas indagaciones se enlistan a continuación:

- El tratamiento fenton fue utilizado por Nivya y Pieus (2016), como segunda etapa de tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos. Esto se decidió, ya que la primera etapa fue un biorreactor de membrana. Este primer escalón como tratamiento no generó altos porcentajes de remoción, por lo que las sustancias remanentes fueron degradadas en la 2ª etapa mencionada. Los resultados mostraron una disminución en la DBO con un 90.2%, en la DQO un 96.2%, el amonio fue removido en su totalidad, fosfatos 82.7% y cloruro con 88.3% (Nivya & Pieus, 2016).
- Una variante interesante fue desarrollada por Hammouda (2015), en la cual se utilizó el proceso de electrofenton mediante hierro inmovilizado con perlas de alginato. El tratamiento se aplicó a residuos en fase acuosa que desprendían olores fétidos. La variable que indicó la disminución de las bacterias que generan dichos olores fue la prueba de indol. Al término del ensayo se estableció que 60 minutos son suficientes para degradar 20 mg/L de indol (Hammouda, et al., 2015).
- Charles y colaboradores (2015), compararon la efectividad de los tratamientos de electrocoagulación (EC) y electrofenton (EF). Esto para tratar de alcanzar la máxima degradación de material orgánico en un reactor sistema batch. Los resultados obtenidos fueron los siguientes para EC 79% de color removido utilizando electrodos de hierro un tiempo de tratamiento de 2 horas. Para el EF el 44% del agua fue descolorizada (Charles, et al., 2015).

- Kuo y Wu (2010), investigaron la degradación del compuesto clorofenol disuelto en fase acuosa. En dicha mineralización se utilizó el Fenton, pero con la variante de generar el radical libre hidroxilo por irradiación solar. Al término de la investigación la presencia del analito disminuyó en un 90% (Kuo & Wu, 2010).
- Yavuz y colaboradores (2010), realizaron una comparación de los tratamientos electroquímico contra electrofenton y electrocoagulación. Las muestras a tratar fueron aguas residuales de refinerías que contenían el fenol. Los resultados alcanzados mostraron una completa remoción de fenoles y DQO, pero en la electrocoagulación el tiempo del electrolisis fue mayor. La técnica más efectiva fue el electrofenton, ya que la remoción de fenoles alcanzó un 98.74% en 6 min y una disminución de la DQO de 75.71% en 9 min (Yavuz, et al., 2010).
- Pérez y colaboradores (2002), utilizaron el fenton para el tratamiento de aguas residuales provenientes de industrias textiles. Para determinar la eficiencia del experimento se evaluó la cantidad reducida de carbono orgánico total, así como la DQO y la cantidad de color que presentaba el afluente. Los principales agentes que se tomaron durante las pruebas fueron: la intensidad de la luz, temperatura, pH Fe (II) y H₂O₂. La concentración del Fe (II) fue desde 0 hasta 400 ppm, del H₂O₂ se utilizó de 0 a 10,000 ppm, con una temperatura de 25°C a 70°C, obteniendo así un efecto positivo en la reducción de carga orgánica (Pérez, et al., 2002).

Al revisar dichas investigaciones se puede establecer que al aplicar el proceso de electrofenton los resultados pueden variar, esto debido al origen y características del contaminante que se desea degradar y con la presencia de otros compuestos orgánicos e inorgánicos. El pH es uno de los elementos más significativos en el proceso Fenton. Esto se evidenció mediante los estudios acerca de este reactivo, que evidenció que sólo se obtiene un resultado positivo si el valor del pH se encuentra en un rango de 2.5 - 4 como lo cito Durán-Moreno *et al.*, 2011; (Citado en Rubio, et al., 2014).

Capítulo IV

Metodología

4.1.- Diagrama de la Metodología

Los pasos que se realizaron en el trabajo de investigación se muestran en la Figura 4:

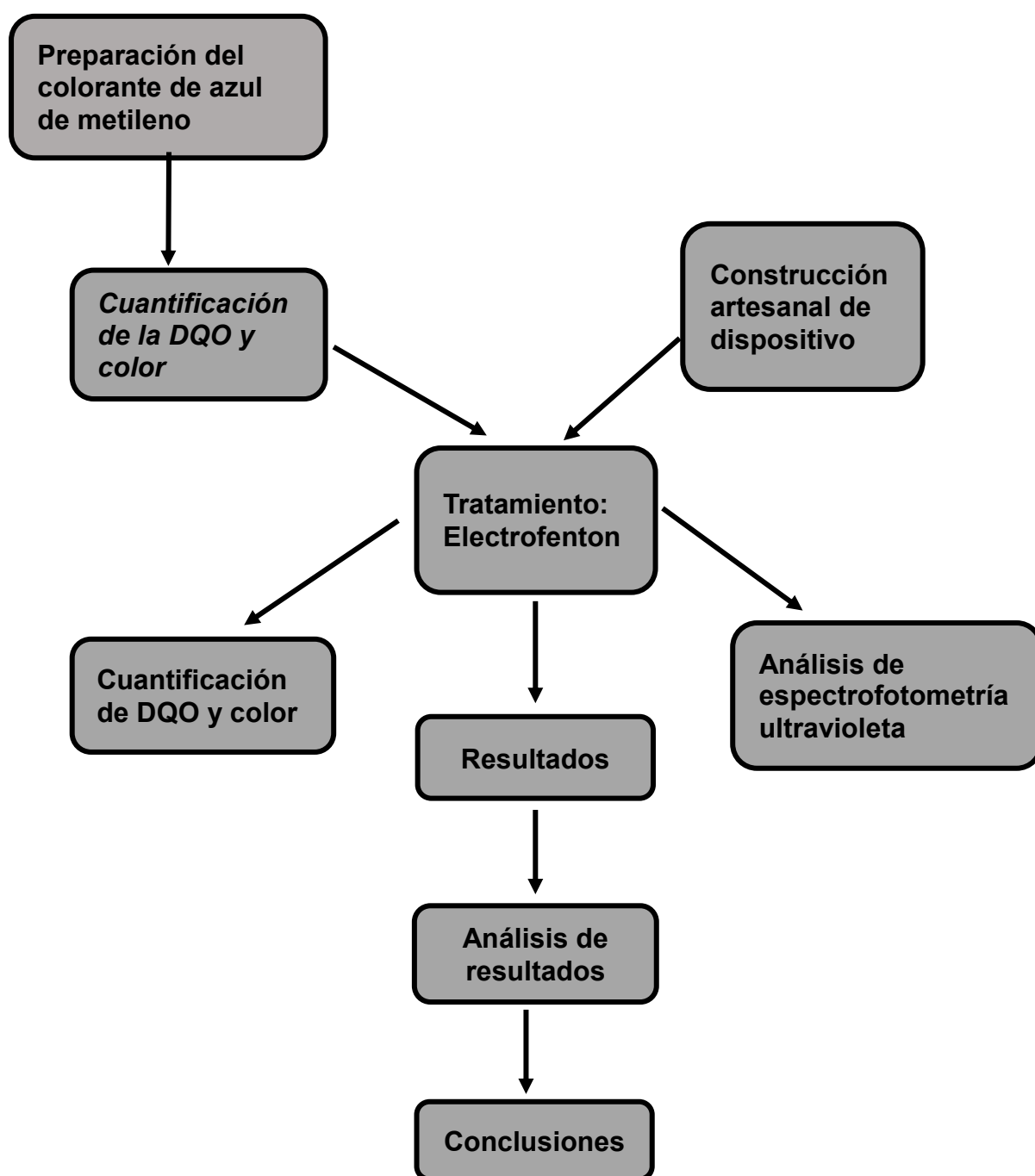


Figura 4. Pasos de la Metodología utilizada en la investigación

Desglose de Actividades

4.1.1. Preparación de Soluciones Sintéticas del Colorante

Preparación de soluciones de colorante azul de metileno. Se prepararon soluciones de colorante Azul de Metileno a concentraciones de 10, 20, 30, 40,

50 y 60 ppm (mgL^{-1}), colocando la cantidad correspondiente de cada solución en un volumen de 500 mL de agua, con esto se tienen las soluciones correspondientes para el trabajo experimental.

4.1.2.- Construcción artesanal del dispositivo

Se diseñó un dispositivo (Ver Figuras 5 a) y 5 b) en el cual las soluciones sintéticas del colorante Azul de Metileno van a moverse a lo largo del dispositivo. Dentro del dispositivo se colocaron piezas de hierro de una longitud de 15 cm x 0.4 cm de diámetro. Fuera del dispositivo las piezas metálicas se conectaron a una fuente de poder, posteriormente se hace pasar la corriente eléctrica con un voltaje de 5 volts, induciendo las reacciones de óxido-reducción, y oxidación –degradación del colorante. Posteriormente se deja que la corriente pase por los electrodos por un periodo de 35 minutos, en los cuales se tomaron muestras cada 5 minutos. Al término de la toma de todas las muestras, estas se prepararon para la determinación de la DQO.

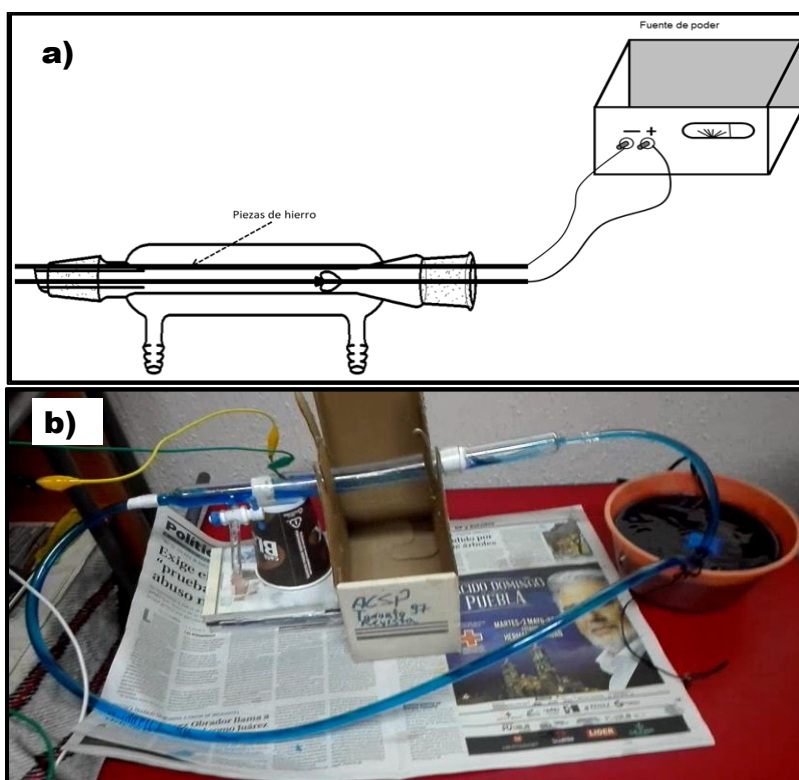


Figura. 5 a) y b). Dispositivo con electrodos. Fuente elaboración propia

4.1.3.- Cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Una vez que se tiene la muestra de agua cruda sintética se procede a la evaluación del parámetro fisicoquímico:

Se trabajan con dos soluciones $\text{Ag}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, agregando en un tubo 3.5 mL y 1.5 mL de cada solución reactivo respectivamente, posteriormente se agrega 0.1 mL del agua a analizar, y por último 2.4 mL de agua destilada, completando un volumen de 7.5 mL.

Este procedimiento se realizó para 2 referencias y los diferentes tipos de aguas crudas y tratadas. Una vez que se realizó este procedimiento los tubos se colocan en un equipo HACH BOX 389 P/N 45600-02, para el respectivo tratamiento térmico durante un lapso de 2 horas (Greenberg, 1992. Pedrero, 1998), por último, se determinan las concentraciones de* estas muestras en un equipo linderbg/blue-M, modelo 601350 A-1.

4.1.4.- Color

Para valorar la disminución del color se realizó el cálculo mediante los valores de absorbancia generada de los espectros de ultravioleta visible. Se compararon los valores de disminución de cada una de las soluciones sintéticas con las curvas generadas de los tiempos de tratamiento. Al final se generó un porcentaje de disminución del colorante.

4.1.5.- Tratamiento Electrofenton

El desarrollo experimental se desarrolló de la siguiente manera:

- a) Se colocaron soluciones sintéticas del colorante azul de metileno dentro del dispositivo mostrado en el punto no.2.
- b) El flujo se realizó mediante la conexión a una bomba peristáltica, con lo cual las soluciones de diferentes concentraciones del colorante recorrieron a lo largo el dispositivo.
- c) Se encendió la fuente de poder manteniendo un voltaje de 5 Volts, para realizar el tratamiento de electrofenton.
- d) Se recolectaron muestras de las soluciones tratadas del colorante en los siguientes tiempos, 0, 5, 10, 15, 20, 25,30, 35 min.

4.1.6.- Determinaciones por espectrofotometría de Ultravioleta

Para llevar a cabo la valoración del colorante se generó una curva patrón de Azul de Metileno, las determinaciones se realizaron por medio de un Espectrofotómetro de UV Lambda Perkin Elmer. Este equipo se utilizó para generar cada uno de los espectros correspondientes a las diferentes concentraciones del colorante. El equipo se muestra en la Figura 6



Figura. 6. Equipo de Espectrofotometría de ultravioleta

4.1.7.- *Cuantificación del Demanda Química de Oxígeno y el Color* de las muestras tratadas. Para este punto las muestras recolectadas de los tiempos de tratamiento fueron manipuladas y se les determino las pruebas fisicoquímicas de la DQO y Color, siguiendo los procedimientos señalados en el punto no, 3.

4.1.8.- Resultados y Análisis

En este punto todos los resultados generados de la remoción de color, de la DQO se integraron para dilucidar y explicar que fue lo que sucedió en el proceso de tratamiento del electrofenton y de establecer los mecanismos que se llevaron a cabo. Posteriormente se deja que la corriente pase por los electrodos por un periodo de 35 minutos, en los cuales se tomarán muestras cada 5 minutos. Al término de la toma de todas las muestras, estas se preparan para las muestras, estas se preparan para la determinación de la DQO.

Capítulo V

Resultados

5.1. Remoción de color de azul de metileno

Una vez que se realizó el tratamiento de electrofentón de las diferentes soluciones sintéticas del colorante disuelto en fase acuosa, estas tuvieron que ser comparadas con los espectros de ultravioleta originales. Para lo cual estos espectros se muestran en la Figura 7.

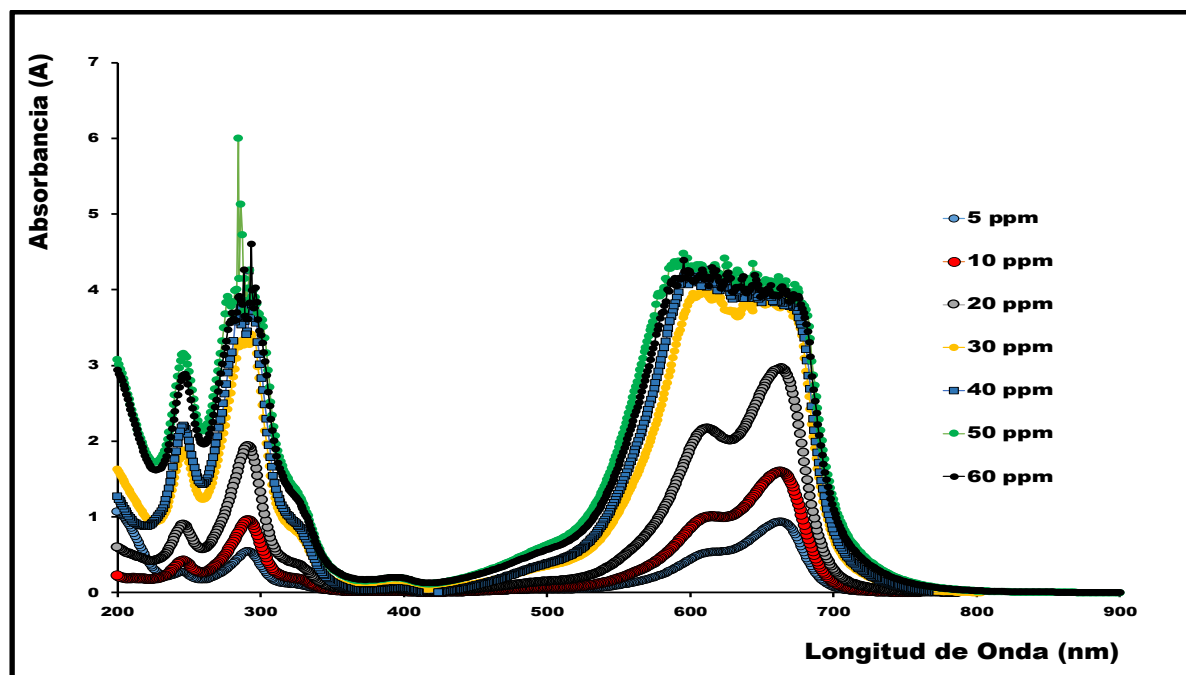


Figura 7. Espectros de las soluciones sintéticas del colorante azul de metileno

Como se puede apreciar la altura de las ondas de cada solución sintética es directamente proporcional a la concentración de las soluciones del colorante. Esto significa que, al aumentar la concentración del colorante en la fase acuosa, la onda correspondiente aumenta significativamente la altura de sus picos característicos, que son en los intervalos de 250 a 300 y 600 a 700 nm. Con respecto a las concentraciones de 50 y 60 mgL^{-1} sus espectros muestran ruidos, esto debido a que en estas concentraciones se pierde la ley de Beer con respecto a la linealidad de la absorbancia contra la concentración.

Una vez que se estudiaron estos espectros, se procedió de recolectar muestras de las diferentes soluciones sintéticas del colorante azul de metileno durante el tratamiento electroquímico. Los tiempos de muestreo fueron al 1, 2, 3, 4, 5 y 10

minutos, esto debido a que se observó que el color de cada una de las soluciones tornaba de color azul a incoloro. Los respectivos espectros se muestran en las Figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13.

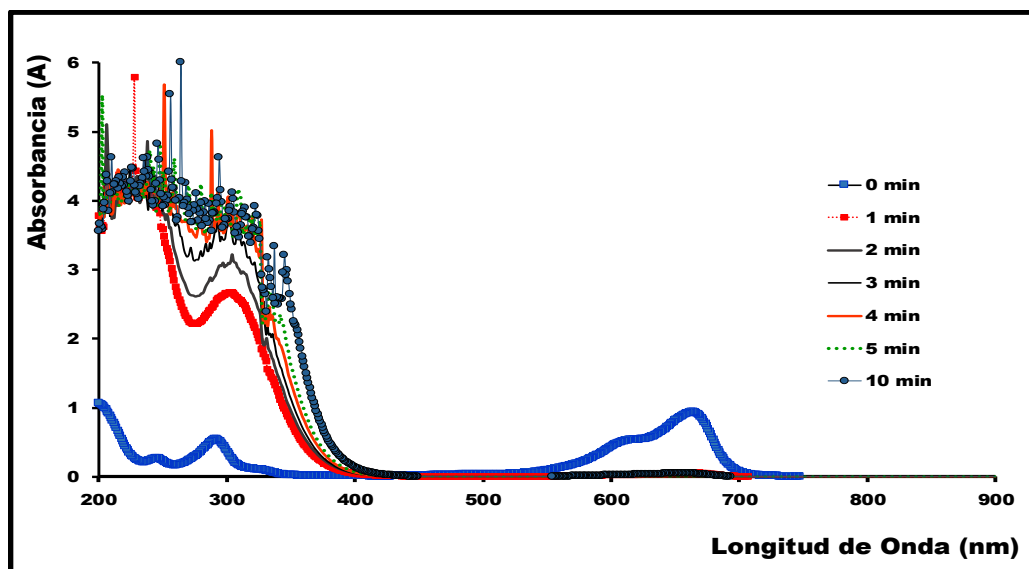


Figura. 8 Espectros de la solución de 10 mgL^{-1} del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.

En la Figura 8 se aprecia la onda de color azul que corresponde al colorante sin ningún tratamiento, los picos característicos se observan en los intervalos de longitud de onda de 250 a 300 y 650 a 700 nm. Estos picos corresponden a los grupos funcionales del colorante azul de metileno, posteriormente desde el minuto uno al minuto 10 desaparecen estos picos y se observan la aparición de otros en el intervalo de longitud de onda de 200 a 300 nm.

Esto indica que se generaron otros compuestos orgánicos diferentes al colorante original. Lo anterior se infiere debido a que el tratamiento aplicado propicia la formación del radical libre hidroxilo ($\text{OH}\bullet$), y su vez esta especie reactiva posee la energía suficiente para romper las estructuras químicas de los compuestos orgánicos.

Este mismo comportamiento se observó en la Figura 9 de 20 mgL^{-1} del colorante azul de metileno. En esta Figura se aprecia también la onda del colorante en color azul sin ningún tratamiento, pero de igual manera a partir de

minuto número uno desaparecen los picos característicos del colorante y ahora los picos en el intervalo de longitud de onda de 200 a 350 nm son muy altos y delgados. Esto indica que se formaron otros compuestos orgánicos favorecidos por las reacciones de radicales libres del tratamiento que provienen de la ruptura de la estructura original del colorante. La altura de estos picos indica que es tal la concentración de estos nuevos compuestos que no cumplen con la ley de Beer en cuanto a la linealidad de la absorbancia contra la cantidad de analito estudiado.

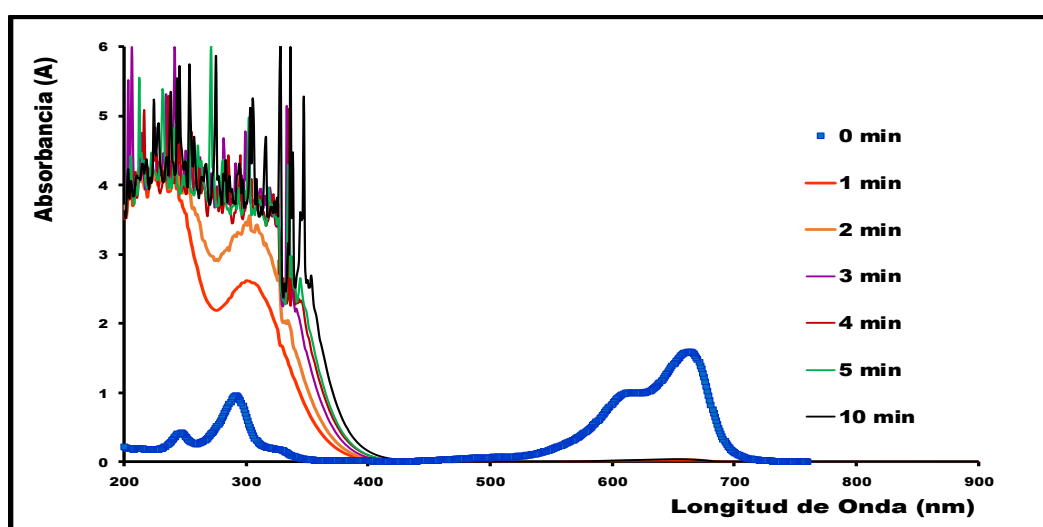


Figura 9. Espectros de la solución de 20 mgL⁻¹ del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.

En la Figura 10 de 30 mgL⁻¹ del colorante de igual manera se puede apreciar de color azul el espectro del colorante sin ningún tipo de tratamiento, a partir del minuto uno los picos particulares del colorante desaparecen y empiezan aparecer en el intervalo de 200 a 350 nm los nuevos compuestos orgánicos.

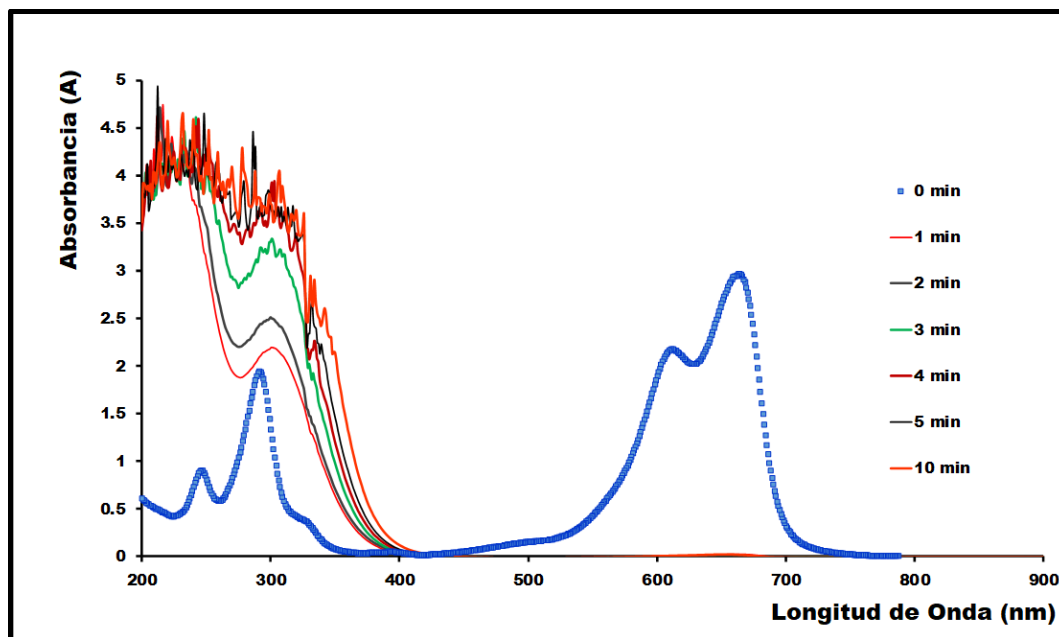


Figura 10. Espectros de la solución de 30 mgL^{-1} del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.

En la Figura 11 se muestran los espectros del colorante a una concentración del 40 mgL^{-1} . A esta concentración la onda del colorante empieza a tener problemas, esto es que el equipo de espectrofotometría de ultravioleta empieza a perder sensibilidad y empieza aparecer el término de “ruido” que corresponde que ya no se cumple la ley de Beer en cuanto a la absorbancia contra la concentración de la sustancia estudiada.

De igual manera a partir del minuto uno desaparece la estructura del colorante y comienzan aparecer picos correspondientes a otros compuestos orgánicos muy diferentes al colorante inicial. Esto se debió como se mencionó anteriormente a las reacciones de radicales libres del tratamiento, en las cuales se rompe la estructura del colorante y las partes divididas se recombinan formando los ya citados nuevos compuestos.

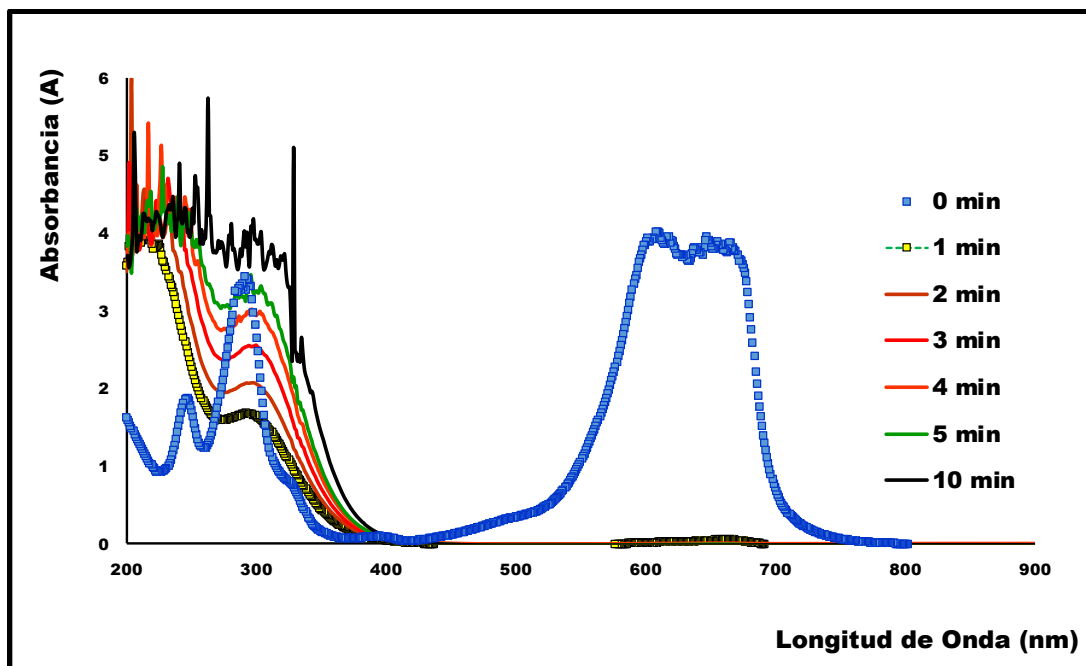


Figura 11. Espectros de la solución de 40 mgL^{-1} del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.

En la Figura 12, la pauta que sigue el tratamiento de electrofofentón es el mismo para las dos soluciones restantes que corresponden a las concentraciones de 50 y 60 mgL^{-1} . En ambas figuras se puede apreciar que el fenómeno de la desaparición del colorante a partir del minuto uno es el mismo. De igual manera la formación de nuevos compuestos orgánicos detectados en el intervalo de longitud de onda de 200 a 350 nm .

Asimismo, en ambas figuras se aprecia de manera marcada el ruido que aparece para el colorante azul de metileno, ya que en los picos del intervalo de 600 a 700 nm ya casi no se aprecia su separación. No obstante, la degradación del colorante a estas concentraciones es detectada. Esto se muestra en la Figuras 13 y 14 cabe señalar que para la concentración de 60 mgL^{-1} , es tal la concentración de nuevos compuestos orgánicos que el equipo lo detecto como una línea que forma parte de un rectángulo, esto se observó en el minuto 10 del tratamiento.

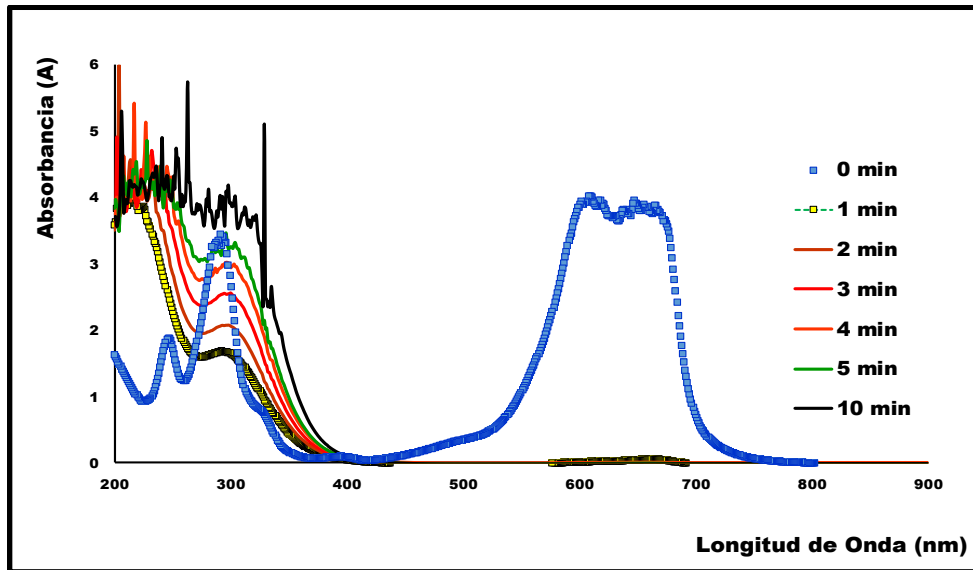


Figura 12. Espectros de la solución de 50 mgL^{-1} del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.

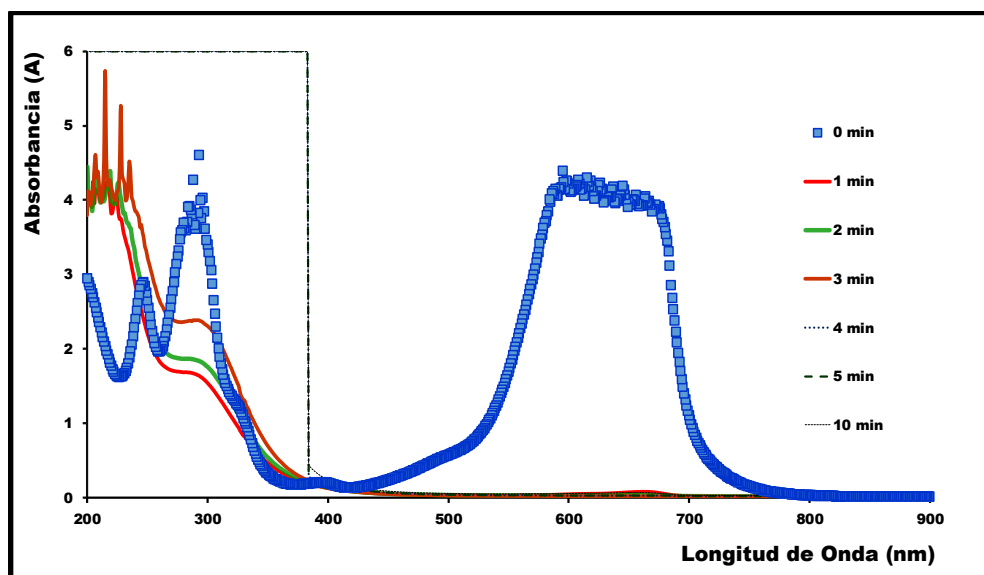


Figura 13. Espectros de la solución de 60 mgL^{-1} del colorante azul de metileno tratadas a diferentes tiempos.

5.2 Remoción de Color de las soluciones del colorante

En este punto se muestran las figuras correspondientes a las soluciones tratadas de diferentes concentraciones de colorante. De esta manera se puede apreciar la diferencia entre la muestra del colorante inicial y las muestras tratadas.

En la recolección de las muestras no se detectó ninguna alteración, pero al momento de tener un tiempo de espera para prepararlas y transferirlas al equipo de espectrofotómetro de ultravioleta se detectó que las reacciones vía radicales libres del tratamiento continuaron en este tiempo y el color que tenían inicialmente recolectadas desapareció notablemente, esto se muestra en la Figuras 15, 16, 17, 18 y 19.



Figura 14. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 10 mgL⁻¹

En la Figura 15 se observan los recipientes correspondientes a las muestras recolectadas en los tiempos 0, 1, 2, 4, 5 y 10 minutos de tratamiento. Se aprecia en el recipiente del tiempo cero corresponde a la concentración de 10 mgL⁻¹, en los siguientes recipientes se aprecia la reducción del color en función del tiempo de tratamiento. Sin embargo, a los 10 minutos de espera de estas muestras se puede constatar el proceso continuo de la reacción de radicales libres, esto se aprecia en la Figura 16

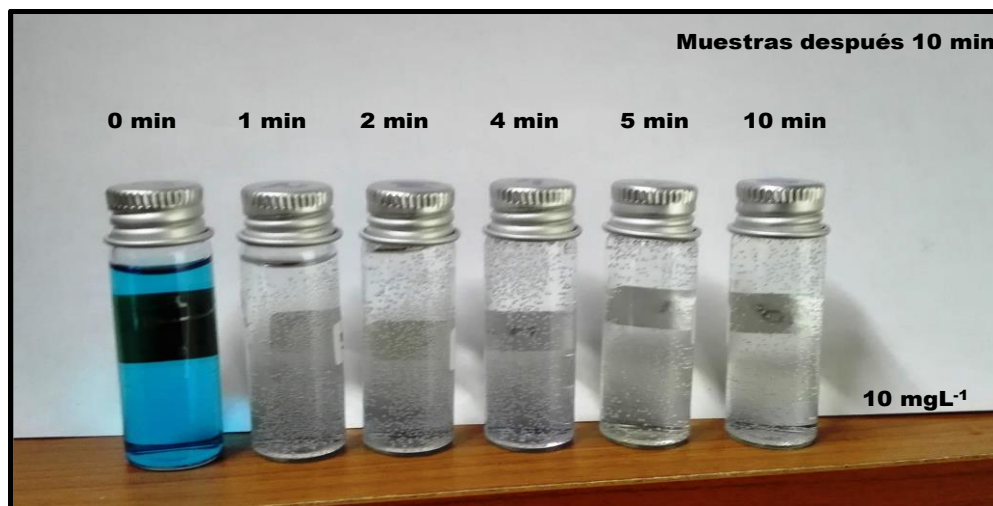


Figura 15. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 10 mgL^{-1} 10 minutos de espera.

En la Figura 16 se puede apreciar claramente que a los 10 minutos de espera en el recipiente de un minuto de tratamiento ya se decoloro totalmente, esto se constató comparando los recipientes en este lapso de tiempo de espera. Este fenómeno se presentó en todas las muestras recolectadas de las soluciones tratadas con el proceso de electrofenton, este comportamiento se muestra para la solución de 30 mgL^{-1} en las Figuras 17 y 18 para muestras instantáneas, a los 10 y 20 minutos de espera.

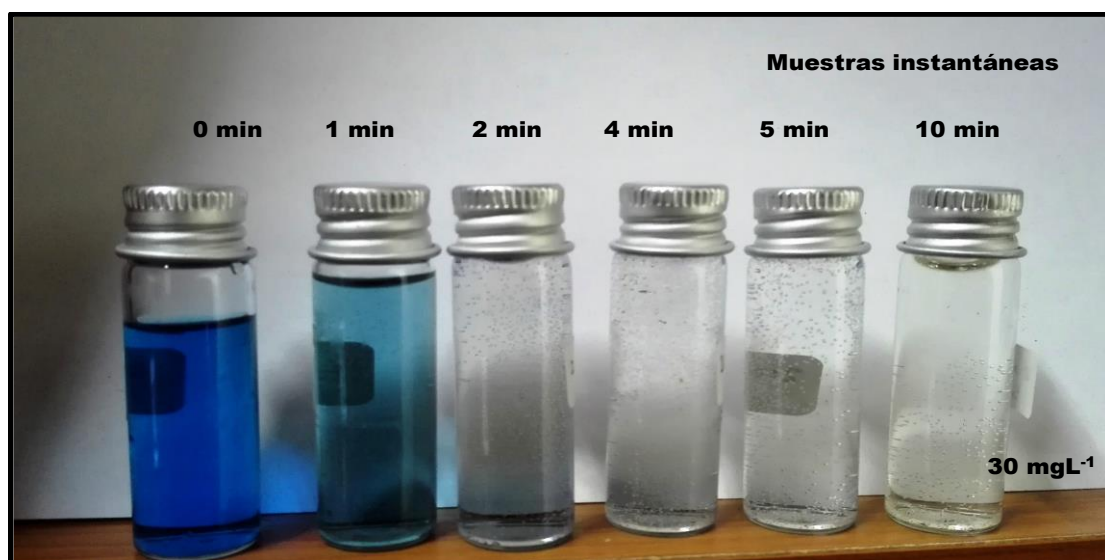


Figura 16. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 30 mgL^{-1} .

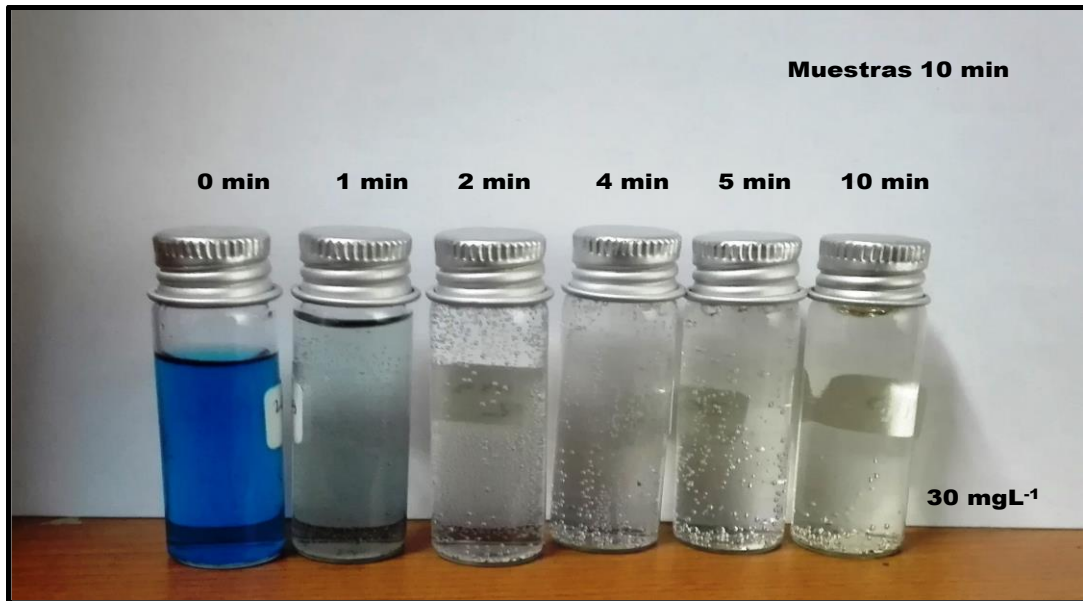


Figura 17. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 30 mgL^{-1} a los 10 minutos de espera.

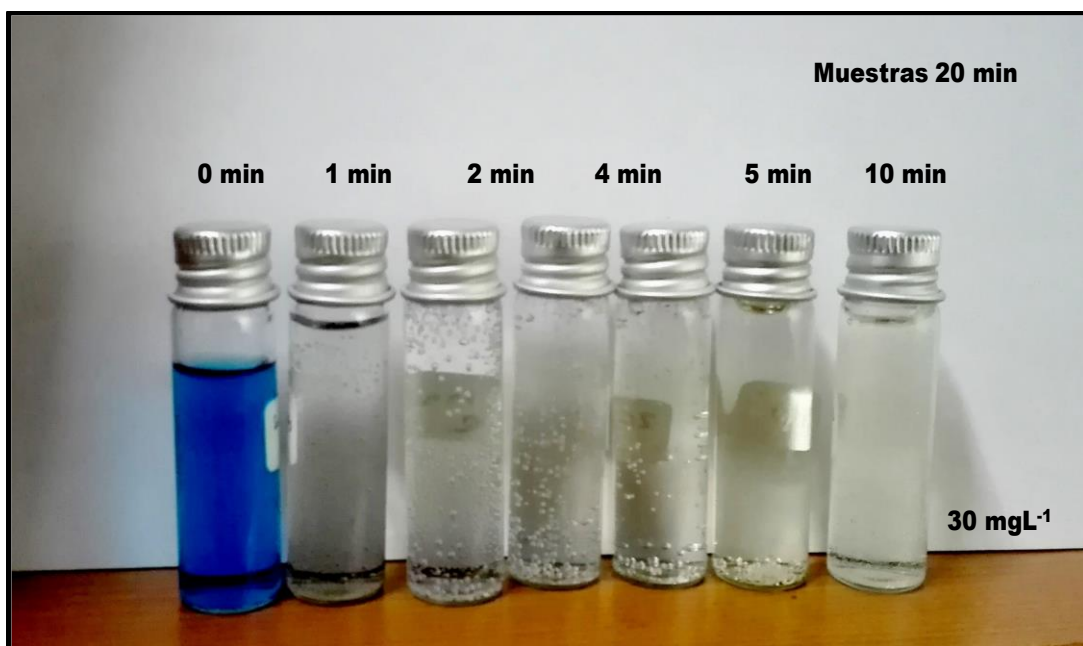


Figura 18. Color de las muestras recolectadas de la solución tratada de 30 mgL^{-1} a los 20 minutos de espera.

Con base en los espectros generados del espectrofotómetro de ultravioleta se determinaron los porcentajes de remoción de color de cada una de las soluciones sintéticas tratadas. Estos resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de porcentajes de remoción del colorante

Solución Sintéticas (mgL⁻¹)	Tiempo de tratamiento (min)	Porcentajes de Remoción (%)
10	1	94
	2	100
	3	100
	4	100
	5	100
	10	100
20	1	94.08
	2	100
	3	100
	4	100
	5	100
	10	100
30	1	97.53
	2	100
	3	100
	4	100
	5	100
	10	100
40	1	96.26
	2	100
	3	100
	4	100
	5	100
	10	100

Fuente: Propia del autor, 2019

Continuación de Tabla 3. Resultados de porcentajes de remoción del colorante

Solución Sintéticas (mgL⁻¹)	Tiempo de tratamiento (min)	Porcentajes de Remoción (%)
50	1	98.42
	2	100
	3	100
	4	100
	5	100
	10	100
60	1	97.41
	2	100
	3	100
	4	100
	5	100
	10	100

Fuente: Propia del autor, 2019

Como se puede observar en todas las soluciones sintéticas de colorante a partir del minuto número uno, el porcentaje de remoción de color fueron casi del 100%. Esto indico que con el tratamiento electroquímico se degrado aproximadamente la totalidad el colorante, esta afirmación se comprobó comparando este porcentaje con la reducción de los picos de los espectros correspondientes al minuto del tratamiento.

Posteriormente al minuto números dos en todas las soluciones sintéticas los porcentajes de remoción fueron del 100% con lo cual el colorante fue totalmente desbaratado en su estructura química que de manera natural proporciona su color característico.

5.3 Propuesta de reacciones de radicales libres

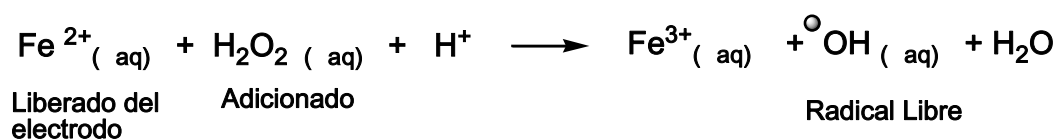
Dado el comportamiento descrito y deducido en los puntos anteriores se muestran las propuestas de reacciones químicas que se llevan a cabo en: a) el electrodo de hierro, b) el hierro liberado y el peróxido de hidrógeno adicionado

y c) la interacción entre los radicales libres y la molécula del colorante azul de metileno. Esto se muestra en las reacciones y en las Figuras 20, 21 y 22.

a) Liberación del hierro en el electrodo, se observa la reacción (1):



b) Interacción del hierro liberado con el peróxido de hidrógeno adicionado, se muestra en la reacción (2):



c) Interacción del radical libre hidroxilo con el colorante azul de metileno (esto se observa en la Figura 20).

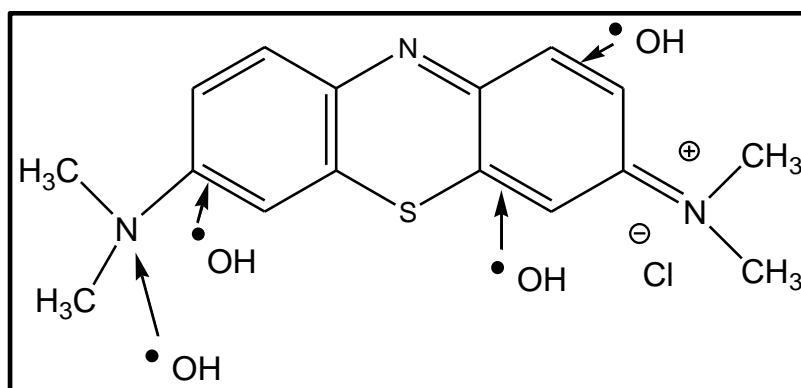


Figura 19. Interacción del radica libre hidroxilo y la molécula del colorante. Fuente. Elaboración propia del autor, 2019

Como se puede apreciar el radical libre rompe enlaces de la estructura del colorante, (lo anterior se llevó a cabo en todas las moléculas del colorante disueltas en la fase acuosa) esto ocasionó que se generen nuevas moléculas con radicales libres que pueden recombinarse, esto se muestra en las Figuras 21 y 22.

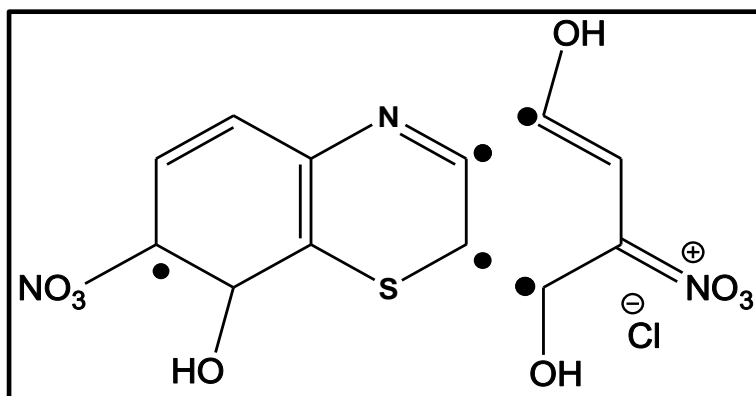


Figura 20. Formación de radicales libres en las moléculas del colorante azul de metileno. Fuente. Elaboración propia del autor, 2019

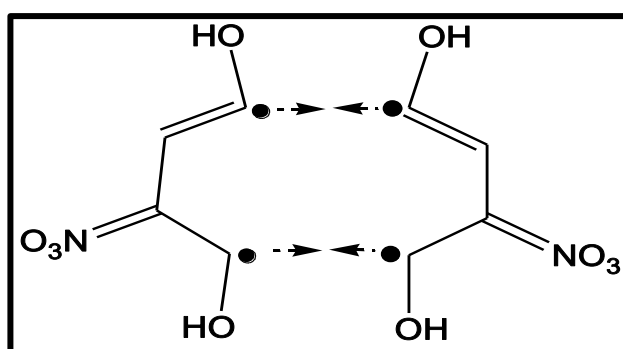


Figura 21. Interacción de moléculas como radicales libres, formación de nuevos compuestos. Fuente. Elaboración propia del autor, 2019

d) Nuevas especies orgánicas que pueden recombinarse (estas se muestran en la Figura 22)

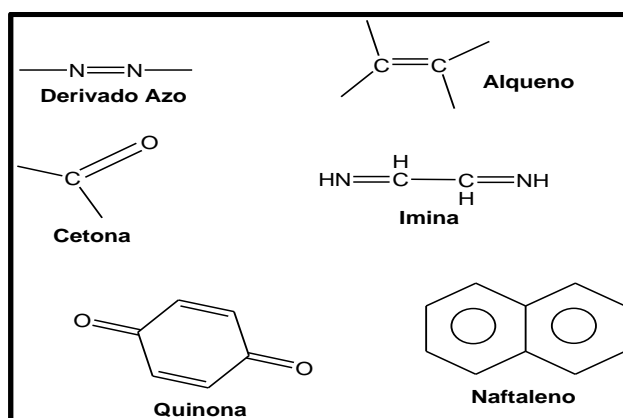


Figura 22. Generación de nuevos compuestos orgánicos debido al ión del radical libre hidroxilo y la molécula del colorante y que pueden recombinarse. Fuente: Elaboración propia del autor, 2019.

Como se puede apreciar en los lugares donde ataco el radical libre hidroxilo, se modifica la estructura formando enlaces con este radical o formando otros nuevos compuestos, que son los que se detectan en los espectros de ultravioleta que se presentaron en el punto de remoción de color empleando el equipo de espectrofotometría de ultravioleta.

5.4 Cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

De cada una de las muestras recolectadas se transfirieron a un equipo bach para realizar la determinación de la DQO, esto con la finalidad de determinar los porcentajes de remoción en cuanto a la materia orgánica disuelta en las soluciones tratadas mediante el proceso de electrofenton. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 de Resultados de la DQO de las soluciones tratadas.

Tiempo en min	DQO 10 mgL ⁻¹	DQO 20 mgL ⁻¹	DQO 30 mgL ⁻¹	DQO 40 mgL ⁻¹	DQO 50 mgL ⁻¹	DQO 60 mgL ⁻¹
0	25.1	51.02	76.53	102.2	127.55	153.6
1	117.51	130.08	195.24	282.96	401.07	459.43
2	205.89	198.86	408.8	501.01	577.05	690.05
3	339.37	385.79	607.16	650.37	788.53	856.45
4	479.16	522.82	723.45	786.91	905.5	1113.4
5	584.58	620.5	946.34	920.38	1008.16	1267.3
10	1175.68	1027.85	1565.7	1549.48	1679.57	1969.13

Fuente: Propia del autor, 2019

Como se puede apreciar los resultados de las DQO's, de las diferentes soluciones sintéticas del colorante azul de metileno, muestran una tendencia de incremento en función del tiempo de tratamiento. El único resultado que no mostro la tendencia fue de la solución de 20 mgL⁻¹ a los 10 minutos. Dado que fue la única variación se puede justificar su comportamiento a error humano en la cuantificación de laboratorio de la DQO.

Por lo cual se trazaron las correspondientes graficas del coeficiente de correlación de cada solución sintética para determinar la relación entre la DQO y el tiempo de tratamiento aplicado a las soluciones, esto se muestra en la Figura 24.

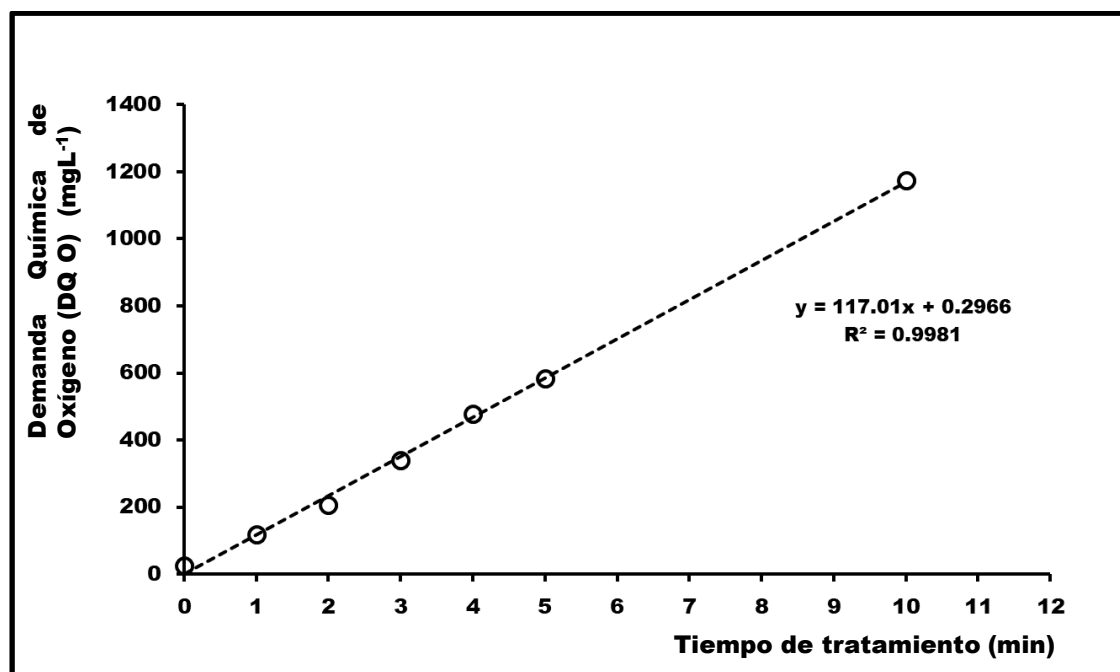


Figura 23. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 10 mgL⁻¹. Fuente: Elaboración propia del autor, 2019.

En esta Figura 24 se aprecia que las relaciones de los valores de la DQO son directamente proporcionales al tiempo de tratamiento de la solución del colorante de 10 mgL⁻¹, esto se estableció mediante el resultado del coeficiente de correlación cuyo valor fue de $r^2 = 0.998$. Al realizar dicho análisis de resultados de esta primera solución sintética de 10 mgL⁻¹, estos no mostraron los resultados esperados de que la DQO disminuyera de manera paulatina.

La razón que explico este comportamiento fue la investigación realizada por Dos Santos y colaboradores (2014), en la cual se llevó a cabo degradación foto catalítica (también genera radicales libres OH●) del colorante tartrazina disuelta en fase acuosa. Los resultados reportaron que durante la fragmentación de este colorante se producen nuevas moléculas orgánicas como radicales libres,

mismas que se recombinaron generaron nuevas sustancias muy diferentes del colorante original (Dos Santos , et al., 2014).

En esta investigación la dilucidación de la identidad de estos nuevos compuestos formados se determinó por técnicas de espectrometrías de masas, de infrarrojo y de cromatografía de gases. Al combinarlas se estableció las estructuras químicas de estas sustancias que se muestran en la Figura 24.

MM (Da)	Deprotonated ion MS (m/z - structure)	Ionic product MS/MS (m/z - structure)	Proposed structure
Tartrazine MW = 534.37	198.2 - [M-H] ⁻	134 - [M-H-SO ₃] ⁻	
Product I MW = 467.41	467.50 - [M-H] ⁻	449 - [M-H-H ₂ O] ⁻ 431 - [M-H-2H ₂ O] ⁻	
Product II MW = 298.25	298.30 - [M-H] ⁻	217 - [M-H-SO ₃ H] ⁻ 189 - [M-H-SO ₃ H-N ₂] ⁻ 184 - [H ₂ CNC ₆ H ₄ SO ₃] ⁻	
Product III MW = 283.24	283.30 - [M-H] ⁻	269 - [M-H-N] ⁻ 229 - [M-H-C ₃ H ₄ N] ⁻ 201 - [M-H-C ₃ H ₂ N ₂ O] ⁻ 189 - [M-H-C ₄ H ₂ N ₂ O] ⁻	
Product IV MW = 239.23	239.20 - [M-H] ⁻	223 - [M-H-O] ⁻ 195 - [M-H-NH ₂ CO] ⁻ 157 - [M-H-C ₃ H ₄ N ₂ O] ⁻	
Product V MW = 185.18	185.20 - [M-H] ⁻	171 - [M-H-N] ⁻ 155 - [M-H-H ₂ N] ⁻ 131 - Unknown 122 - Unknown	

Figura 24. Estructura de nuevos compuestos formados por tratamiento electrofenton. Fuente: Dos Santos y colab. 2014.

En esta investigación los resultados de la DQO se incrementaron en función del tiempo de tratamiento. Esto se propuso con base a esta investigación reportada, ya que estos nuevos compuestos tienen que ser oxidados químicamente por los reactivos señalados en la sección de metodología.

En esta investigación no se pudo determinar las estructuras de dichas nuevas sustancias, ya que los análisis son muy costosos, de ahí que solo se plantee al final del tratamiento la generación de estas nuevas moléculas resultantes.

De igual manera se muestra la Figura 25, en la cual se determinó el coeficiente de correlación entre la DQO y el tiempo de tratamiento de la solución de 20 mgL⁻¹.

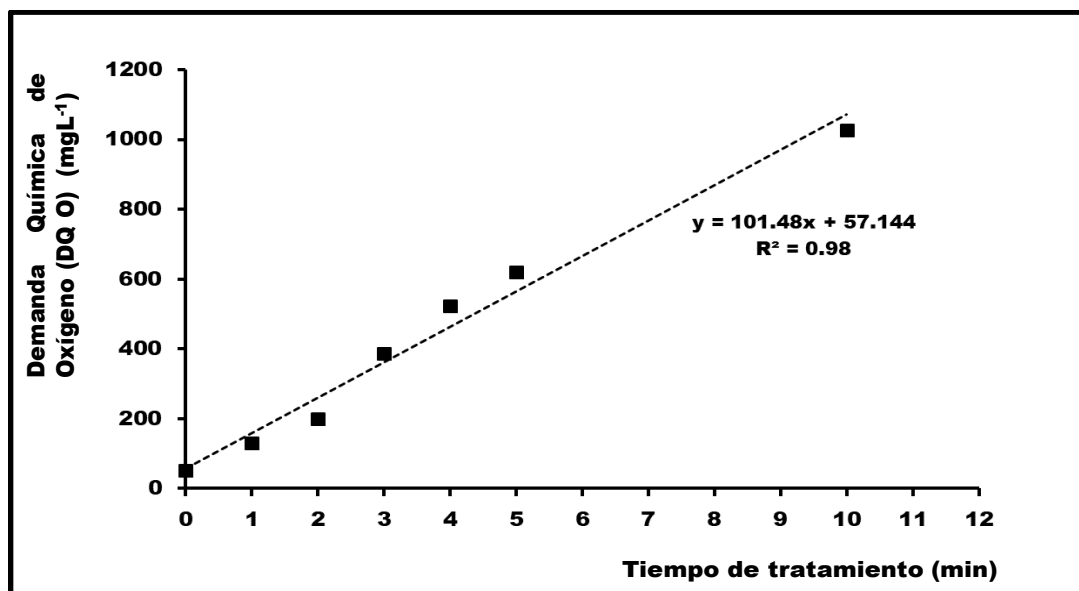


Figura 25. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 20 mgL⁻¹. Fuente: Elaboración propia del autor, 2019.

En la Figura 25 se puede apreciar la relación directa entre el valor de la DQO y el tiempo de tratamiento, de igual manera que en la Figura 24 el coeficiente de correlación muestra una relación directa entre ambas variables ($r^2 = 0.98$). Esto corroboró la propuesta de la generación de otros compuestos orgánicos generados del tratamiento electroquímico, que genera radicales libres y que son los responsables de la formación de estas nuevas sustancias.

Este mismo comportamiento (del incremento de los valores de la DQO en función del tiempo de tratamiento) se observó en las soluciones sintéticas de las soluciones de 30, 40, 50 y 60 mgL⁻¹, esto se confirmó mediante los correspondientes coeficientes de correlación de estas soluciones sintéticas tratadas electroquímicamente (esto se muestra en las Figuras 26, 27, 28 y 29)

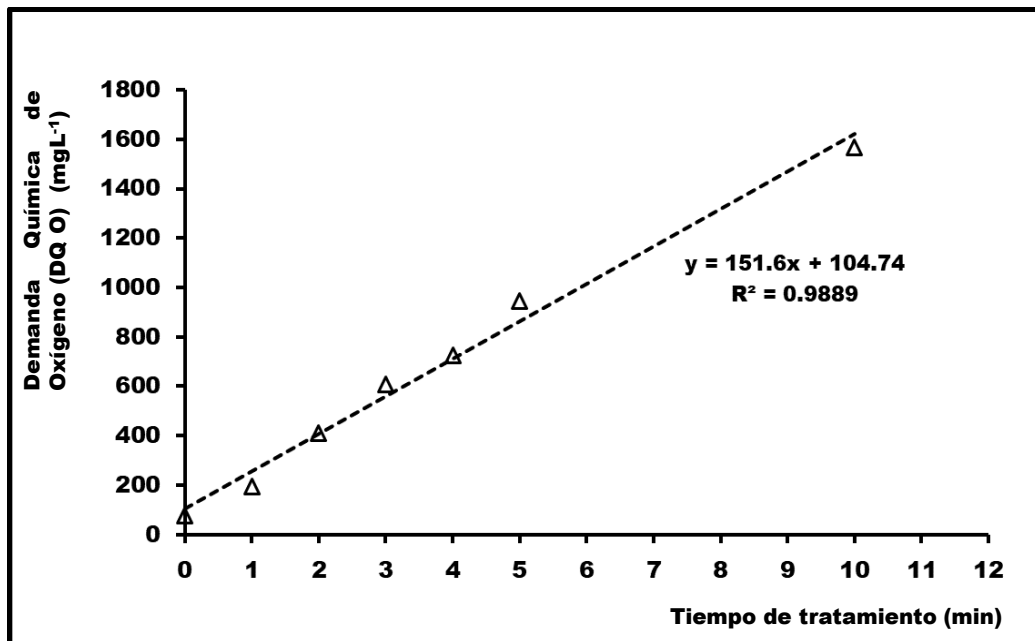


Figura 26. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 30 mgL⁻¹. Fuente: Elaboración propia del autor, 2019.

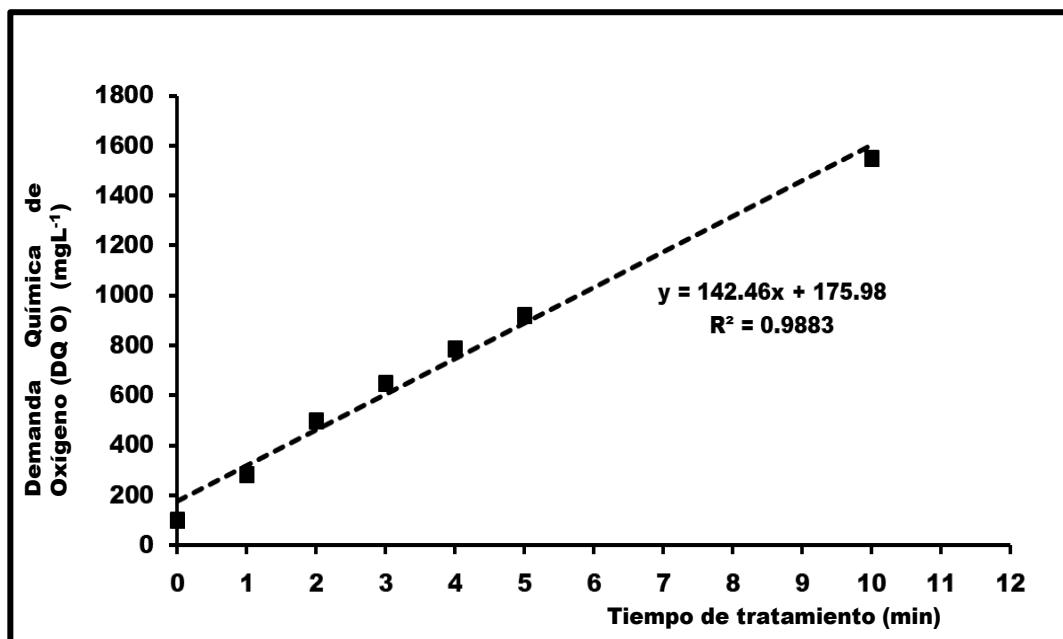


Figura 27. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 40 mgL⁻¹. Fuente: Elaboración propia del autor, 2019.

Como se puede observar en estas Figuras 26 y 27, las relaciones de la DQO con respecto al tiempo de tratamiento son directamente proporcionales. Esto indica que conforme aumento el tiempo de tratamiento los valores de la demanda química de oxígeno aumentaron.

Otro punto a señalar es que los valores de esta variable (DQO) aumentan en forma proporcional a la concentración del colorante disuelto en las soluciones sintéticas, esto nos indicó que la concentración de los subproductos generados del tratamiento electroquímico también aumento en comparación con las concentraciones obtenidas en las primeras soluciones diluidas del colorante.

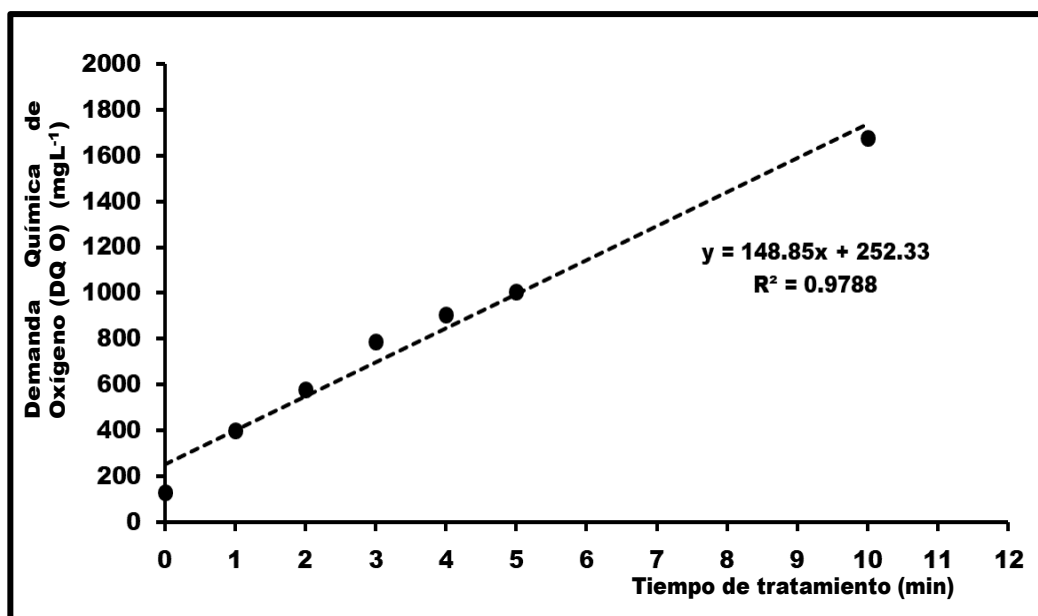


Figura 28. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 50 mgL⁻¹. Fuente: Elaboración propia del autor, 2019.

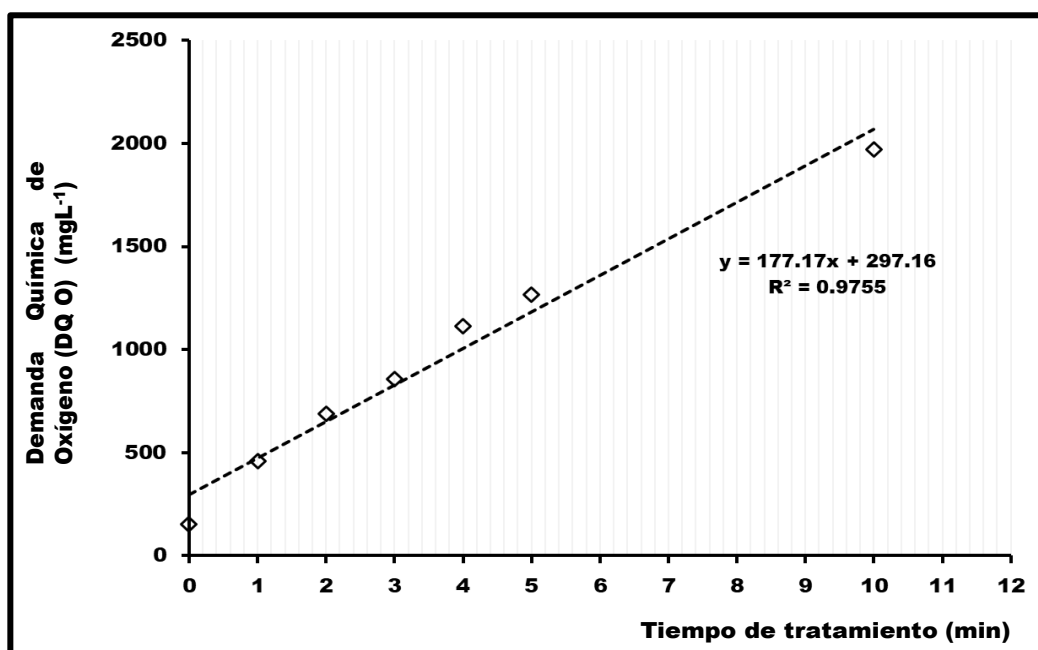


Figura 29. Coeficiente de correlación entre DQO y tiempo de tratamiento de solución 60 mgL⁻¹. Fuente: Elaboración propia del autor, 2019.

El comportamiento descrito anteriormente se presentó también en las soluciones del colorante de 50 y 60 mgL⁻¹ (Incremento de la DQO en función del tiempo de tratamiento). Con esto se estableció que en todas las soluciones sintéticas del colorante después del tratamiento electroquímico, el colorante fue degradado. Pero debido a las reacciones de radicales libres características de este tratamiento se formaron nuevos compuestos orgánicos diferentes al colorante original. Estas sustancias difieren del colorante tanto en su estructura química como en la característica de no generar color a la correspondiente solución tratada.

Este comportamiento es totalmente diferente al planteado inicialmente de la investigación, en el cual se predijo que al ir aumentando el tiempo de tratamiento electroquímico el valor de la DQO de las soluciones tratadas decrecería proporcionalmente. Esta alteración se verificó por la generación de los compuestos orgánicos formados en el tratamiento de electrofenton, por los análisis de espectrofotometría de ultravioleta y por los valores de la DQO.

Al finalizar este trabajo de investigación se estableció que este diseño propuesto para el tratamiento del agua residual que contiene disueltos contaminantes, puede ser efectiva en cuanto a la degradación del color. Pero para lograr la disminución de la DQO es necesario realizar el tratamiento en periodos de tiempo más largos, esto con base en un estudio en que los autores utilizaron el mismo tratamiento y que fue reportado recientemente (Santana, et al., s/f Manuscript accepted). Por los autores propusieron al menos realizar el tratamiento por dos o más horas, para mineralizar el colorante totalmente.

Al finalizar esta investigación se estableció que el tratamiento remueve en un 100% de eficiencia el color, a la par este también propicio el incremento de la DQO. Lo anterior se traduce en materia orgánica, esta situación es por así decirlo la menos problemática, ya que en el estudio de Dos Santos (2014) mostro que las estructuras de las nuevas sustancias son menos complejas.

Por lo que un tratamiento más prolongado del electrofenton para estos compuestos, terminaría en la degradación de los mismos. Debido a esta razón es que se plantea que el tratamiento sea como tiempo mínimo de dos horas.

Finalmente se hace hincapié que las investigaciones reportadas por los autores de diversas universidades internacionales se llevan a cabo con equipo y material altamente eficiente. En este trabajo desarrollado el material fue en un 100 por ciento artesanal en lo que respecta al diseño del dispositivo, a la fuente de poder, a los electrodos, reactivos obsequiados.

Aunado a lo anterior, las pruebas que tuvieron que enviarse a laboratorio acreditada son extremadamente costosas, por lo que el financiamiento de esta investigación fue la principal limitante.

Al analizar los resultados de color y DQO, se plantea la pregunta ¿Qué es mejor, reducir el color o la DQO? Esta misma cuestión se la han hecho tanto las industrias como los científicos. La respuesta estaría en función de que es lo que se desea. Si la empresa desea remover el color de sus aguas residuales, pero percibe que la DQO aumenta, podría proponer una etapa anexa de tratamiento para disminuirla utilizando otros métodos de tratamiento diferentes al utilizado.

Capítulo VI

Conclusiones

Una vez finalizado este trabajo se generaron las conclusiones que a continuación se enlistan:

- El tratamiento electroquímico electrofenton, demostró una gran eficiencia en la degradación del colorante azul de metileno en todas sus soluciones sintéticas. Esto se corroboró por la detección la desaparición del color del colorante al minuto del tratamiento y por los resultados de porcentajes de remoción de color.
- Con esta conclusión se cumple tanto con la hipótesis y el objetivo general planteados al inicio de la investigación, ya que se alcanzó el 100% de eficiencia en la remoción de color.
- El tratamiento electrofenton genera de manera insitu el radica libre hidroxil ($\text{OH}\bullet$) que mostro gran efectividad para degradar el colorante. Sin embargo, debido a su naturaleza reactiva de este radical se generaron paralelamente otras moléculas como radicales libres del mismo de colorante.
- Los radicales libres generados tienen la facilidad de recombinarse entre sí, con lo cual da como resultado la formación de nuevos compuestos orgánicos.
- Estos compuestos orgánicos son totalmente diferentes al colorante azul de metileno cuanto a la estructura química y la característica física de color. Esto se corroboró con los espectros generados de la espectrometría de ultravioleta, donde de manera específica los picos no son representativos del pigmento estudiado.
- Los valores de la Demanda Química de Oxígeno mostraron que estos se incrementaron de forma directamente proporcional con el tiempo de tratamiento, esto se justificó debido a la generación de estos nuevos compuestos disueltos en fase acuosa.

- Con base en los resultados finales y los tiempos de tratamiento, si este tratamiento se toma en consideración para su escalamiento a nivel industrial, se recomienda incrementar el tiempo de tratamiento de una a dos horas. Esto para alcanzar una mineralización óptima de toda la materia orgánica disuelta en la fase acuosa.

Bibliografía

- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C, 2018. *Agua.Org.mx*. [En línea]
Available at: <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-por-metales/>
- Lenntech B.V, 2018. *Lenntech*. [En línea]
Available at: <https://www.lenntech.es/faq-contaminantes-del-agua.htm>
- Agua.org.mx, 2018. [En línea]
Available at: <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua/>
- AINIA, 2016. *ainia*. [En línea]
Available at: <https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/oxidacion-en-agua-supercritica-aplicaciones-para-tratamientos-de-depuracion-de-aguas-residuales/>
- Albis A, A., López, A. J. & Romero, . M. C., 2017. Removal of methylene blue from aqueous solutions using cassava peel (*Manihot esculenta*) modified with phosphoric acid. *SCIELO*, pp. 60-73 .
- Alonso, J. I. L., 2013. *Aplicacion de la tecnologia de UV/H2O2 para la remediacion de contaminantes pesistentes en la CAPV*, s.l.: URA.
- Alvarez, G., 2016. *Analisis y modelamiento de sistemas ambientales*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro de Peru.
- Álvarez-Torrellas, 2017. La adsorción como alternativa de tratamiento de contaminantes emergentes en el agua. *Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid*, p. 7.
- Anon., 2014. *El agua en México*. [En línea]
Available at: <http://www.fusda.org/revista11pdf/Revista11%20-5ELAGUAENMEXICO%20.pdf>
[Último acceso: 21 septimenre 2014].
- Anon., 2017. *tratamiento de aguas residuales - ELAI-UPM*. [En línea]
Available at:
www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/AutomatizacionMaster/.../TAR.doc
- Archundia, L. V. D., 2007. *Tratamiento de desechos mixtos por descargas de plasma termico*. Queretaro(Queretaro): Universidad Autonoma de Queretaro.
- Arrazcaeta, L. O., 2002. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS POR PLAGUICIDAS. *Fitosanidad*, pp. 55-62.
- Bautista Suárez, L., 2011. *Degradación de colorante (azul de metileno) por métodos electroquímicos*. [En línea]
Available at: <https://studylib.es/doc/8671323/degradaci%C3%B3n-de-colorantes--azul-de-metileno--por-m%C3%A9todo>
[Último acceso: 25 Octubre 2019].
- BELZONA, 2016. *Tratamientos de agaus residuales*, Miami, USA: Belzona Inc.

Bermúdez, X. C., Fleites Ramírez, M. & Contreras Moya, A. M., 2009. ESTUDIO DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESATEXTIL "DESEMBARCO DEL GRANMA" A ESCALA DELABORATORIO. *Tecnología Química*, pp. 64-73.

Carbotecnia, 2014. *Osmosis inversa*. [En línea]
Available at: <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-la-osmosis-inversa/>

Carmona, P. B., 2008. Madrid: Universida Autonoma de Madrid.

Cartazar, A., 2011. *Decoloración de aguas residuales provenientes de la industria textil*. [En línea]
Available at: <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6199/>
[Último acceso: Octubre 2019].

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Avanzadas CEDEX, 2013. *Catalogo de residuos utilizables en la construccion*. [En línea]
Available at: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/30/lodos-de-depuradoras/valorizacion/129/tratamiento-de-deshidratacion-y-secado-termico.html>

Centro de Informacion y Comunicacion Ambiental de NorteAmerica, 2014. *Contaminacion del agua*. Distrito Federal: s.n.

Charles, D., Arivazhagan, M. & Tuvakara, F., 2015. Decolorization of distillery spent wash effluent by electro oxidation (EC and EF) and Fenton processes: A comparative study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, pp. 142-148.

Clean Air Technology Center, 2005. *Uso de plasma no termico para controlar contaminantes en el aire*, Carolina del Norte: EPA.

Clemente, A. R., Arrieta, E. L. C. & Mesa, G. A. P., 2013. Procesosde tratamiento de aguas residualespara la eliminacion de contaminantes organicos emergentes. *REDALYC*, pp. 5-6.

CONAGUA, 2007. *Manual de agua potable y alcantarillado*, Mexico: gobierno de Mexico.

CONAGUA, 2009. *NORMAS OFICIALES MEXICANAS. NOM-001-SEMARNAT-1996*. [En línea]
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
[Último acceso: 21 Octubre 2019].

CONAGUA, 2010. *Compendio de estadisticas ambientales 2010*. [En línea]
Available at:
http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_ap ps/WFServlet28b9.html#
[Último acceso: 5 noviembre 2014].

CONAGUA, 2016. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Mexico: Gobierno de Mexico.

CONAGUA, 2016. *Normas Oficiales Mexicanas*. [En línea]
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
[Último acceso: 21 Octubre 2019].

CONAGUA, 2018. *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO*. [En línea]
Available at: www.cna.gob.mx

CONAGUA, 2019. *Manual de Agua Potable, alcantarillado y saneamiento*, Ciudad de Mexico:
Gobierno de Mexico.

Concepto. de, 2019. *Contaminantes Primarios y Secundarios*. [En línea]
Available at: <https://concepto.de/contaminantes-primarios-y-secundarios/>
[Último acceso: 21 Octubre 2019].

Contaminacion ambiental.net, 2018. *Contaminacion Ambiental. net*. [En línea]
Available at: <https://contaminacionambiental.net/contaminacion-del-suelo/#Que es la contaminacion del suelo>

Cortazar Martínez, A., oronel Olivares, C., Escalante Lozada, A. & González Ramírez, C., s/f.
Contaminación generada por colorantes de la industria textil. [En línea]
Available at: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
[Último acceso: 25 Octubre 2019].

COSUDE, 2005. *GUÍA PARA EL DISEÑO DE DESARENADORES Y*, Lima: Organizacion
Panamericana de la Salud.

Cyclus, 2017. [En línea]
Available at: <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/desinfeccion/>

Dapeng, L., 2009. The progress of catalytic technologies in water purification: A review.
ScienceDirect, pp. 2-7.

Degremont, 2018. *Coagulación y Floculación en el agua*. [En línea]
Available at:
http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/coagulacion_floculacion_agua.pdf

Domènech, X., Jardim, W. F. & Litter, M. I., 2004. Procesos avanzados de oxidación para la
eliminación de contaminantes. *ResearGate*, pp. 5-6.

Dos Santos , T. G. y otros, 2014. Assessment of the breakdown products of solar/UV induced
photolytic. *Food and Chemical Toxicology*, pp. 307-315.

Enciclopedia de Clasificaciones, 2017. *tiposde.org*. [En línea]
Available at: <https://www.tiposde.org/ciencias-naturales/792-tipos-de-contaminacion-del-agua/#ixzz5OquaPNqP>

Envira IOT, 2019. *Contaminantes Primarios y Secundarios*. [En línea]
Available at: <https://enviraiot.es/contaminantes-primarios-y-secundarios-mas-peligrosos/>
[Último acceso: 21 Octubre 2019].

Fernandez-Alba, A. R., 2006. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*, Madrid:
Elecé Industria Gráfica.

Fernandez, A. & Rodríguez, A., 2017. *Tratamientos avanzados de aguas residuales
industriales*. Madrid: Elecé Industria Gráfica.

- Fernandez, S., 2014. *PREZI*. [En línea]
Available at: <http://prezi.com/evhqsej7uqx-/contaminantes-inorganicos/>
[Último acceso: 22 SEPTIEMBRE 2014].
- Figuroa, D., 2012. Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz. *Scielo*, p. 10.
- Forero, . J., Díaz, J. & Blandon, V., 1999. DISEÑO DE UN NUEVO SISTEMA DE FLOTACION PARA AGUAS RESIDUALES. *Scielo*, p. 9.
- Forero, J. E., Ortiz, . O. P. & Rios, . F., 2005. Aplicacion de Procesos de oxidacion avanzada como un tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refineria. *Scielo*, pp. 7-14.
- Ghanbari, F. & Moradi, M., 2015. Acomparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxicoagulation for decolorization of real textile wastewater: Electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Enviromental Chemical Engineering*, 3(1), pp. 499-506.
- Glinsk, D. A. y otros, 2018. Analysis of pesticides in surface water, stemflow, and throughfall in an. *ELSEVIER*, pp. 496-507.
- Gobierno de Xalapa, 2018. *Comision municipal de agua potable y sanemiento*. [En línea]
Available at: <https://cmasxalapa.gob.mx/gom/wp-content/uploads/2018/11/DESCRIPCION%20DEL-PROCESO-DEL-TRATAMIENTO-DE-AGUAS-RESIDUALES..pdf>
- Gomez, A., 2013. *SlideShare*. [En línea]
Available at: <https://es.slideshare.net/arnoldofabianduran/cribado-o-rejillas>
- Gómez, J. L. T., 2010. *Capa.gob.mx*. [En línea]
Available at: <http://www.capa.gob.mx/cultura/pdfs/tratamiento.pdf>
- Gonzalez, D., 2018. *TECPA*. [En línea]
Available at: <https://www.tecpa.es/edar-tratamiento-secundario-depuracion-aguas/>
- Gonzalez, M., 2010. *La guía Química*. [En línea]
Available at: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/electrodisposicion>
- Hamidreza Pourzamani, Hajizadeh, Y. & Mengelizadeh, N., 2018. Application of three-dimensional electrofenton process using MWCNTs-Fe nanocomposite for removal of diclofenac. *Process Safety and Environmental Protection*, pp. 271-284.
- Hammouda, S. B. et al., 2015. Effective heterogeneous electro-Fenton process for the degradation of amalodorous compound Indole using iron loaded alginate beads as a reusable catalyst. *ELSEVIER*, pp. 47-58.
- HIDRITEC, 2016. [En línea]
Available at: <http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-agua-potable-con-ozono>
- Huiman, I. M. F. S. G., 2018. *Medio ambiente y Desarrollo sostenible*. [En línea]
Available at: <http://fgonzalesh.blogspot.com/2011/01/contaminacion-por-fertilizantes-un.html>
- iagua, 2019. *Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Módulo III)*. [En línea]

Available at: <https://www.iagua.es/legal>
[Último acceso: 21 Octubre 2019].

Jardim, W. F., 2004. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACION PARA LA ELIMINACION DE CONTAMINANTES. *ResearGate*, p. 18.

Jiahao, M. y otros, 2018. A review on agro-industrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, pp. 395-405.

Jimenez, R. C. G., 2009. *Cinetca de degradacion de colorantes textiles de diferentrs clases químicas por hongos y bacterias*. Bogota: s.n.

Kaur, S., Kaur, R. & Chauhan, B. S., 2017. Understanding crop-weed-fertilizer-water interactions and their. *Crop Protection*, pp. 65-72.

Kuo, W. S. & Wu, L. N., 2010. Fenton degradation of 4-chlorophenol contaminated water. *Solar Energy*, Volumen 84, pp. 59-65.

Labiadh, L. y otros, 2015. Complete removal AHPS synthetic dye from water using new electro-fenton oxidation catalyzed by natural pyrite as heterogeneous catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, Volumen 297, pp. 34-41.

Leidy, R., 2017. TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES – UNA REVISIÓN. *Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales*.

LENNTECH, 2019. [En línea]

Available at: <https://www.lenntech.es/micro-y-ultra-filtracion.htm>

López Ceballos, C. R., García, N. & Valdez, 2010. Evaluación de la presencia de metales en residuales líquidos y su efecto potencial para. *Redalyc*, p. 34.

Maldonado Rogel, A. N. & Molina Ayala, R. M., 2011. *Estudio para la reduccion de colorantes de als aguas residuales de la industria textil a traves de procesos electroquimicos*. Cuenca: s.n.

Martínez, A. C. & Olivares, C. C., 2016. *Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo*. [En línea]

Available at: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>

Martínez, C., 2007. *Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo*. [En línea]

Available at: <http://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>

[Último acceso: 29 septiembre 2014].

Martínez-Huitle, C. A., 2005. Oxidación electroquímica: Una alternativa para el tratamiento de aguas con contaminanter organicos. *AFINIDAD*, p. 27.

Mendez, C. G., 2016. *Tratamientos de aguas mediante descargas de microondas*. Madrid: Universidad de Cordoba.

Meng-hui Zhang, y otros, 2019. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of The Total Environment*, pp. 110-121.

Meng-hui, Z. y otros, 2018. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of The Total Environment*, pp. 110-121.

- Mollah, M. Y. A., Gomes, J. A., Das, K. K. & Cocke, D. L., 2010. Electrochemical treatment of Orange II dye solution—Use of aluminum sacrificial electrodes and floc characterization. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 851-858.
- Montoya, G. V., 1967. *Tratamientos primarios*, Colombia: Universidad del Valle Cali.
- Moreira, M., 2006. Tecnologías para el tratamiento de efluentes. *AFINIDAD*, pp. 563-564.
- Moreno, A., Figueroa, D. & Hormaza, A., 2012. Adsorción de azul de metileno. *Scielo*, pp. 9-18.
- Música Álvarez, V., 2014. *Escasez y contaminación del agua: un problema de seguridad nacional*. Mexico: s.n.
- Neoh, C. H., Noor, Z. Z., Ahmad Mutamim, N. . S. & Lim, C. K., 2015. Green Technology in Wastewater Treatment Technologies: Integration of Membrane Bioreactor. *Chemical Engineering Journal*, pp. 582-594.
- Nivya, T. K., IT.K., N. & T.Minimol , P., 2016. Comparison of Photo ElectroFenton Process and combination of PEF process and Membrane Bioreactor in the treatment of Landfill Leachate. *ELSEVIER*, pp. 224-231.
- Nivya, T. & Pieus, T. M., 2016. Comparison of Photo ElectroFenton Process(PEF) and combination of PEF Process and Membrane Bioreactor in the treatment of landfill leachate. *Procedia Technology*, pp. 224-231.
- Olivares, A. C. M. / . C. C., 2015. Contaminacion generada por colorantes de la industria textil. *Universidad Automa del Estado de Hidalgo*, pp. 1-10.
- Ortiz, F. L. R., Wert, E. C. & Snyder, S. A., 2010. Evaluation of UV/H₂O₂ treatment for the oxidation. *Water Research*, pp. 1440-1448.
- P.V.Nidheesh, 2012. Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *ELSEVIER*, p. 4.
- Panizza, M. & Cerisola, G., 2008. Electrochemical generation of H₂O₂ in low ionic strength media on gas diffusion cathode fed with air. *Electrochimica Acta*, pp. 876-878.
- Peréz, M., Torrades, F., Domènech, X. & Peral, J., 2002. Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents. *Water Research*, pp. 2703-2710.
- Pérez, M. F., Armenteros Ordóñez, T. d. I. Á. & Hernández Touset, J. P., 2016. SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LAS AGUAS RESIDUALES EN LA EMPRESA. *Scielo*, pp. 68-75 .
- Piña , S., 2007. *Decoloración biologica del colorante azul directo 2 en n filtro anaerobio/aerobio..* [En línea]
[Último acceso: 25 Octubre 2019].
- Portela, J. R., 2010. Oxidacion en agua supercritica; una tecnologia prometedora mas cerca de ser implantada. *Infoenviro*, p. 4.
- QUIMSA, 2017. *Industrial Maintenance*. [En línea]
Available at: <https://www.quimsaitw.com/cloracion-tratamiento-del-agua-potable/>
- Ramos, L. P. y., 1982. *Contaminacion del aire*. Ciudad de Mexico: bvs.

- Remtavares, 2017. *MadridBlog*. [En línea]
Available at: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491>
- Ríos Donato, N., 2018. *Red Universitaria Jalisco*. [En línea]
Available at: <http://www.cucei.udg.mx/es/noticia/contaminacion-de-agua-por-colorantes-y-propuesta-de-remediacion>
- Rodie, E. B., 2016. *Tratamientos de aguas residuales*, Mexico: Continental.
- Rodríguez, S., Bermúdez, R. & Korouma, M., 2006. Selección de cepas de *Pleurotus Ostreatus*. *Revista Mexicana de Micología*, Volumen 23.
- Rodriguez, T., Botelho, D. & Cleto, E., 2008. Treatment of industrial effluents of recalcitrant nature using ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Scielo*, p. 29.
- Rubio, C. A., Chica, A., Peñuela, E. & Gustavo, A., 2014. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Scielo*, pp. 211-223.
- Salud, S. d., 2016. *Diario Oficial*. [En línea]
Available at: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166148/nmx-aa-044-scfi-2014.pdf>
- Santana, G. y otros, s/f Manuscript accepted. Electro-Fenton and Electro-Fenton-like with in situ. *Electrochimica Acta*, Issue s/p.
- Sarria, V. y P. C., 2018. DESARROLLO DE PROCESOS FOTOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS ACOPLADOS COMO UNA ALTERNATIVA NATURAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS. *Universidad del Valle/ Instituto de Cinara*, p. 109.
- SEMARNAT, 2009. *Diario Oficial*. [En línea]
Available at: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166148/nmx-aa-044-scfi-2014.pdf>
- SEMARNAT, 2011. *Indicadores de desempeño Ambiental. Calidad del Agua*. [En línea]
Available at: <https://enviraio.es/contaminantes-primarios-y-secundarios-mas-peligrosos/>
[Último acceso: 21 Octubre 2019].
- SEMARNAT, 2014. *SEMARNAT*. [En línea]
Available at: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/normas-oficiales-mexicanas>
[Último acceso: 10 novimebre 2014].
- SEMARNAT, 2015. *Diario oficial*. [En línea]
Available at: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166148/nmx-aa-044-scfi-2014.pdf>
- SEMARNAT, 2018. *Compendio estadístico ambiental 2010*. [En línea]
Available at:
http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_ap ps/WFServletceadb.html
- Shah, A. H. y otros, 2019. Revisiting Electrochemical Reduction of CO₂ on Cu Electrode: Where Do we Stand about the intermediates?. *PHYSICAL CHEMISTRY*, pp. 18528-18536.
- Shang, N.-C., 2007. Oxidation of methyl methacrylate from semiconductor wastewater by O₃/UV processes. *ELSEVIER*, p. 308.

Solíz, M. C. T., 2016. *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas*. Barcelona(Catalunya): Universidad Politécnica de Catalunya.

SPENA GROUP, 2018. *SAFE H2O*. [En línea]

Available at: <http://spenagroup.com/tratamiento-secundario-del-agua-aguas-residuales-sistema-aerobico/>

Suárez, L. B., 2011. ORIZABA(VERACRUZ): s.n.

Terán, S. T., 2016. *PROCESOS DE OXIDACION AVANZADA EN AGUAS*, BARCELONA: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA.

Toledo, A., 2002. El agua en México y el mundo. *Redalyc*, pp. 16-17.

Trovó, A. G. y otros, 2012. Paracetamol degradation intermediates and toxicity during photo-Fenton treatment using different iron species. *Water Research*, Volumen 46, pp. 5374 - 5380.

Ulucan, K. & Kurt, U., 2015. Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, pp. 104-111.

UNESCO, 2009. *UNESCO*. [En línea]

Available at: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-15-water-pollution/>

[Último acceso: 24 septiembre 2014].

Vaca, M. M., 2016. TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES POR FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO. *Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco*, p. 8.

Velez, R., 2012. *El agua como asunto de seguridad nacional*, DF, México: UNAM.

Xiaohu Li, X., Nannan, Z., Irini, A. & Zhang, Y., 2017. Novel bioelectro-fenton technology for azo dye wastewater treatment using microbial reverse electro-dialysis electrolysis. *Biosource Technology*, Volumen 228, pp. 322-329.

Yavuz, Y., A. Savaş Kopalal, A. S. & Öğütveren, Ü. B., 2010. Treatment of petroleum refinery wastewater by electrochemical methods. *Desalination*, pp. 201-205.

Zafar, M. N. y otros, 2018. Effective adsorptive removal of azo dyes over spherical ZnO nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology*, p. 713–725.

