

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de residuales de la Industria Textil

Trabajo de investigación presentado
por Claudia Rodríguez para optar al grado académico de
Licenciada en Química

Guatemala

2011

Procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de residuales de la Industria Textil

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

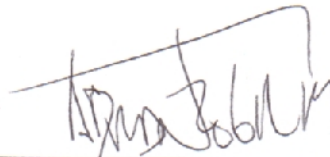
Procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de residuales de la Industria Textil

Trabajo de investigación presentado
por Claudia Rodríguez para optar al grado académico de
Licenciada en Química

Guatemala

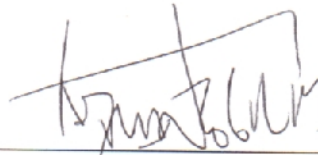
2011

Vo. Bo.:

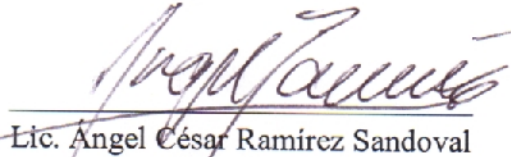


Dr. Adrián Gil Méndez

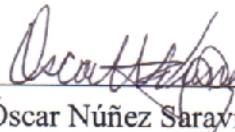
Tribunal Examinador:



Dr. Adrián Gil Méndez



Lic. Angel César Ramírez Sandoval



Ing. Óscar Núñez Saravia

Fecha de aprobación: Guatemala, 28 de enero de 2011

PREFACIO

¿Qué es la vida? Un frenesí.

¿Qué es la vida? Una ilusión,

una sombra, una ficción,

y el mayor bien es pequeño:

que toda la vida es sueño,

y los sueños, sueños son.

- Pedro Calderón de la Barca

Este trabajo lo dedico a las tres madres que me ha dado la vida: la madre naturaleza, la madre patria y mi mamá Maritza. A la primera la pido perdón por no ver el daño que sufre del cual soy partícipe, por no respetarla y valorarla; a la segunda le pido perdón por no escuchar su sufrimiento y no valorar el esfuerzo de quienes dieron (y dan) su vida por ella; y a mi mamá Maritza le pido perdón por no decirle lo mucho que la quiero, admiro y respeto con la frecuencia que ella merece, ella es un impecable ejemplo de lo que es una verdadera madre y un verdadero padre. A las tres les doy las gracias por permitirme ser parte de ellas y por enseñarme lo que es amor verdadero.

Además agradezco a todas aquellas personas que me han enriquecido con los pincelazos de color que han puesto en el canvas de mi vida. A Mamá Rosita, mis padrinos, tío y tías, primos, amigos y compañeros que han estado, están y estarán conmigo. Un agradecimiento muy especial a mi abuelo Papá Chepe (Q.E.P.D.), por su ejemplo de vida, enseñarme lo que significa una persona trabajadora, honrada y humilde.

ÍNDICE

PREFACIO	v
ÍNDICE	vi
TABLA DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS.....	3
IV. MARCO TEÓRICO.....	4
V. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA	7
VI. COMBINACIÓN H ₂ O ₂ /UV.....	11
VII. OZONIZACIÓN (O ₃).....	13
VIII. COMBINACIÓN UV/O ₃	17
IX. COMBINACIÓN O ₃ /H ₂ O ₂ (PEROXONO).....	19
X. PROCESO FENTON	23
XI. PROCESO FOTO-FENTON	25
XII. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA (UV/TiO ₂).....	26
XIII. CUADRO COMPARATIVO DE PROCESOS.....	27
XIV. CONCLUSIONES.....	28
XV. RECOMENDACIONES.....	29
XVI. BIBLIOGRAFÍA.....	30

TABLA DE FIGURAS

ECUACIONES

Ecuación 1-3: Reacción general de AOP	9
Ecuación 4-9: Reacción para el AOP con H ₂ O ₂ /UV	11
Ecuación 10-17: Reacción para el AOP con O ₃	15
Ecuación 18-19: Reacción para el AOP con UV/O ₃	17
Ecuación 20-22: Reacción para el AOP con H ₂ O ₂ /O ₃	20
Ecuación 23-30: Reacción para el Proceso Fenton	23
Ecuación 31-33: Reacción para el Proceso Foto-Fenton	25

FIGURAS

Figura 1 Reacciones de oxidación de los compuestos durante la ozonización	14
Figura 3 Esquema del mecanismo de degradación a través del proceso O ₃ /UV	17
Figura 4 Esquema del mecanismo de reacción en agua a través del proceso de peroxono	20
Figura 5 Tiempo vs. Radio de remoción de color a valores de pH distintos (concentración del colorante 50mg/L, temperatura 25°C, tasa de flujo 0.82 cm/s, e intensidad de luz 3.15 mW/cm ²)	26

TABLAS

Tabla 1 Distintos compuestos oxidables a través de AOPs	7
Tabla 2 Constante de velocidad de reacción (k, L mol ⁻¹ s ⁻¹)	8
Tabla 3 Potencial oxidativo para agentes oxidantes convencionales	9
Tabla 4 Comparación entre oxidación por ozono y peroxono	21

RESUMEN

Guatemala sufre serios problemas de contaminación a nivel de suelos, atmósfera y, principalmente, aguas. A nivel nacional se observa la prevalencia de contaminación en los cuerpos de agua debido al uso excesivo de fertilizantes e insecticidas, productos de desechos orgánicos e industriales, entre éstas últimas las aguas residuales textiles. En este trabajo de investigación se proponen los métodos de oxidación avanzada como un método efectivo y sencillo para el tratamientos de aguas residuales de la industria textil. Se concluyó que para la industria textil guatemalteca se recomienda una combinación de H_2O_2/UV por su bajo costo y facilidad de instalación y se recomienda usarlo como método complementario en una planta de tratamiento, no como método único para mejorar la calidad del agua.

I. INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación aérea, terrestre y marina ha tomado importancia a través de los últimos años en Guatemala. Debido a sucesos como la eutrofización del lago de Amatitlán y, más recientemente, el problema de cianobacteria en el lago de Atitlán se ha hecho un especial énfasis en la preservación de cuerpos de agua en Guatemala. En los ríos de Guatemala el mayor problema es el exceso de nutrientes en los mismos debido a aplicación de abonos en tierras aledañas, así como industrias textiles y alimenticias. El exceso de nutrientes, particularmente de fosfatos y nitratos, provoca crecimiento acelerado de algas e incrementa la probabilidad de eutrofización.

La subcuenca del Río Michatoya abarca parte de los departamentos de Escuintla y Guatemala, y se origina en el lago de Amatitlán. Esta subcuenca es de suma importancia a nivel industrial y comunal, y actualmente es fuente de energía hidroeléctrica. Recientemente se realizó un estudio por parte de la Fundación Defensores de la Naturaleza (FDN) en la cual se analizaron parámetros físicos, químicos y microbiológicos en siete secciones de la cuenca. Debido a la longitud de la cuenca, se encuentran distintas características del agua a través de la misma, esto significa que no se puede aplicar un tratamiento generalizado a la cuenca ya que requiere de tratamientos específicos por sección. Además debido al tipo de compuestos encontrados en exceso, particularmente fosfatos, sulfatos, nitritos y nitratos, se dificulta la elección de un método químico ya que estos iones son particularmente difíciles de tratar.

Una mejora química en la calidad de agua de la subcuenca prolonga la vida útil de las represas e infraestructura de generación, favorece la vida marina y amplía el uso que se le puede dar al agua, ya sea recreacional, de riego o industrial.

II. JUSTIFICACIÓN

El problema de contaminación de aguas es un problema a nivel internacional, sin embargo en Guatemala éste ha sido recientemente destacado por la situación del lago de Amatitlán, el lago de Atitlán y la Laguna del Tigre. Debido a la falta de regulación de desechos industriales y domésticos liberados a los ríos y cuerpos de agua, se han presentado numerosos problemas a nivel nacional al elevarse los niveles de contaminantes en los mismos. La subcuenca del Río Michatoya se encuentra actualmente afectada con exceso de nutrientes y alta contaminación microbiana, sin embargo se continúa haciendo mal uso de la misma. Industrias textiles y agrícolas, principalmente, requieren grandes cantidades de agua para funcionar, y liberan grandes cantidades de contaminantes en retorno. Sin embargo, al afectar la calidad del agua, también se ven afectadas estas industrias ya que un agua con exceso de nutrientes forma sedimentos en drenajes y tuberías, lo cual tiene un impacto negativo a nivel económico ya que se requieren dragados o cambio de tuberías para solucionar los problemas.

Además de los problemas de sedimentación y exceso de nutrientes en el agua, existe el problema de la coloración en las aguas residuales, con colores tan diversos como azul, morado, turquesa, entre otros. Una variación en el color del agua afecta la absorbancia de la luz en el cuerpo de agua, alterando así las condiciones necesarias para la vida de la flora y fauna de la cuenca.

Los procesos de oxidación avanzada (AOPs por sus siglas en inglés) proveen un tratamiento eficiente de aguas residuales de la industria textil al descomponer un amplio rango de tintes presentes en el agua y lograr un aclarado significativo en el cuerpo de agua.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Recopilar información sobre los distintos procesos de oxidación avanzada disponibles para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

B. Objetivos específicos

1. Determinar cuál es el proceso de oxidación avanzada más efectivo para el tratamiento de aguas residuales textiles con tintes de gran complejidad.
2. Determinar cuál es el método más simple de AOPs aplicable en la industria textil guatemalteca.

IV. MARCO TEÓRICO

Guatemala es un país que cuenta con numerosos recursos hídricos cuyo volumen es suficiente para satisfacer la demanda de agua potable a nivel doméstico e industrial pero debido a la contaminación superficial de los cuerpos de agua, se ve restringido el acceso al agua potable (Oliva Hernández y Pérez Sabino 2005). A esto se debe sumar la distribución desigual de la población, donde las áreas más pobladas tienen una menor disposición de agua. Varios ríos se encuentran severamente contaminados, como el Río Motagua, Río Villalobos, Río Michatoya, entre otros. Asimismo el Lago de Amatitlán se ha visto afectado por ser el receptor del 50% de las aguas negras de Ciudad de Guatemala a través del Río Villalobos (IARNA 2000). La salida principal del Lago de Amatitlán es el río Michatoya lo cual aumenta considerablemente la contaminación en este río (Salas 1991).

La cuenca de Amatitlán también conocida como cuenca del Río Michatoya es particularmente vulnerable a desastres debido al uso intensivo que se hace de la misma y sus recursos, aumentando la contaminación en los ríos de la cuenca. El agua de la cuenca se emplea para distintas actividades, entre ellas satisfacer la necesidad de agua potable en los asentamientos humanos alrededor a la cuenca, como agua de riego en la agricultura y tiene diversos usos en la industria (López Choc 1999). Esta cuenca es de gran interés a nivel nacional es la cuenca ya que contiene mucho urbanismo así como una amplia variedad de condiciones físicas (IGN 1972). Entre las actividades más comunes dentro de la cuenca están: beneficios de café, industrias textiles, metalúrgicas, azucareras y químicas, granjas y explotación de canteras de materiales no ferrosos. De estas industrias pocas empresas cuentan con tratamiento de aguas residuales y disposición adecuada de desechos. Varios estudios han determinado una alta concentración de nitrógeno y fósforo en la cuenca, debido al rápido crecimiento demográfico lo cual aumenta las aguas residuales domésticas, y la industrialización e intensificación de agricultura. A nivel doméstico las fuentes de fósforo son residuos humanos y de comida, y detergentes. A nivel industrial se encuentra el procesamiento de alimentos, comercios, e industrias así como rastros (Tetzaguic Car 2003).

Para FDN la importancia de la cuenca radica en que es en esa área en donde se creará el Jardín Botánico Nacional. Por lo que, además de generar un Plan Director del Jardín Botánico Nacional y una caracterización de la Flora del área, se realizó un Plan de Manejo de Recursos Hídricos-Forestales con el fin de restaurar la integridad ecológica del área. El plan de manejo incluyó la caracterización de la calidad del agua de la cuenca y se determinó que a nivel fisicoquímico y microbiológico el agua del área es de muy mala calidad. Se registró niveles muy altos de sulfatos, nitratos, nitritos, fosfatos y amonio, además de una coloración fuerte y un olor pungente en ciertos puntos.

Al analizar los resultados obtenidos se determinó que la baja calidad del agua podría afectar negativamente a las flora del jardín si se empleara como agua de riego. Por ello se planteó la idea de crear una pequeña planta de tratamiento de aguas residuales en un punto estratégico del área del Jardín Botánico que no solo sirviera para mejorar la calidad del agua del Jardín, sino también se pudiera emplear como planta de tratamiento modelo para fomentar el tratamiento de aguas residuales en la región.

Actualmente la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales funcionan con una conversión progresiva de materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando las bacterias adecuadas. En un proceso de tratamiento las fases usualmente son: tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. El tratamiento primario consiste en la remoción de sólidos a través de rejillas, mallas, filtros etc. El tratamiento secundario se enfoca en la remoción de sólidos en suspensión y exceso de compuestos, mientras que el tratamiento terciario consiste en pasos adicionales, como filtración o desinfección (Arévalo, y otros 2009).

Los métodos químicos para tratamiento de agua residuales son escasos, ya que existen numerosas limitantes de costo, instalación, producción de residuos tóxicos, además tiene la desventaja de que no son reutilizables los sustratos y son poco selectivos. (Rodríguez Martínez, y otros 2002). En este caso se sugieren procesos biológicos aerobios, ya sea con cultivos en suspensión o con cultivos fijos (Rodríguez Fernández-Alba, y otros 2006).

Durante la realización del estudio de FDN se observó que la coloración del agua varió según el día de toma de muestra, desde un tono verde intenso hasta un color morado profundo, pasando por tonos como turquesa, rojo y azul intenso. Se concluyó que la coloración fuerte es resultado directo de los residuos vertidos por las empresas textiles situadas en la cuenca. En la industria textil se recomienda un tratamiento de remoción de color en el agua, ya que la coloración del agua afecta la biota presente en el cuerpo de agua receptor de las aguas residuales. Los AOPs se han usado para el tratamiento de agua potable e industrial en varios países con considerable éxito (Kos y Perkowski 2003). A nivel de aguas residuales se ha empleado exitosamente en aguas con restos de compuestos orgánicos recalcitrantes como pesticidas, colorantes, farmacéuticos, surfactantes entre otros (Stasinakis 2008).

En Guatemala, la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) es la encargada de la normalización técnica para determinar los niveles de calidad de distintos productos y servicios. En el caso de descarga de aguas se decretó el acuerdo gubernativo 236-2006 que emite el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (MARN 2006). En este Reglamento se establecen los parámetros a ser medidos para determinar la calidad de agua de una muestra así como un modelo de reducción progresiva de contaminación por descargas que pretende aumentar significativamente la calidad del agua descargada mediante el ajuste de límites máximos permisibles a través del tiempo, llegando a la meta en 2024. Entre los parámetros tomados en cuenta están los fisicoquímicos y los microbiológicos. Entre los parámetros fisicoquímicos se encuentra el color del agua cuyo límite máximo actual es de 1500 unidades platino-cobalto, y se propone descender ese valor a 500 unidades platino-cobalto. Dado que no se propone ningún método de reducción de color en los cuerpos de agua, los AOPs se presentan como una alternativa viable y rápida para alcanzar los valores impuestos por la normativa.

V. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

Estos procesos tienen mucho potencial y se han usado para el tratamiento de agua potable e industrial en varios países como Francia, Alemania, Canadá y Estados Unidos (Kos y Perkowski 2003). A nivel de aguas residuales se ha empleado exitosamente en aguas con restos de compuestos orgánicos recalcitrantes como pesticidas, colorantes, farmacéuticos, surfactantes entre otros (Stasinakis 2008). Es su mecanismo de reacciones en cadena, el cual involucra radicales hidroxilo e hidroperoxilo, el que permite la aplicación de la oxidación avanzada a un amplio número de compuestos que se encuentran en las aguas residuales (Kos y Perkowski 2003). Los radicales hidroxilo ($\text{HO}\bullet$) son efectivos para descomponer los compuestos orgánicos dado que son electrófilos reactivos, por lo cual reaccionan rápidamente y no selectivamente con casi todos los compuestos orgánicos ricos en electrones (Stasinakis 2008). Entre los compuestos oxidables por radicales hidroxilo están:

Tabla 1 Distintos compuestos oxidables a través de AOPs

Ácidos	Fórmico, glucónico, láctico, málico, propiónico, tartárico
Alcoholes	Bencilo, tert-butilo, etanol, etilenglicol, glicerol, isopropanol, metanol. Propenediol
Aldehídos	Acetaldehído, benzaldehído, formaldehído, glioxal, isobutiraldehído, tricloroacetaldehído
Aromáticos	Benceno, clorobenceno, clorofenol, creosote, diclorofenol, hidroquinona, p- nitrofenol, fenol, tolueno, triclorofenol, xileno, trinitrotolueno
Aminas	Anilina, aminas cíclicas, dietilamina, dimetilformamida, EDTA, propanediamina, n-propilamina
Tintes	Antraquinona, diazo, monoazo
Éteres	Tetrahidrofurano
Cetonas	Dihidroxiacetona, metil etil cetona

(Rodríguez 2003)

Si bien los AOPs son capaces de descomponer varios tipos de compuestos se debe tomar en cuenta que la constante de velocidad de reacción entre radical hidroxilo y otros compuestos difiere enormemente según la estructura del mismo. Por ejemplo los alquenos son oxidados más fácilmente debido a su doble enlace, mientras que los compuestos saturados son más difíciles de oxidar (Rodríguez 2003). El orden de la constante de velocidad de reacción según el tipo de compuestos se clasifica de la siguiente manera:

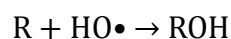
Tabla 2 Constante de velocidad de reacción (k , $L mol^{-1} s^{-1}$)

Compuestos	$OH\cdot$
Alquenos clorados	10^9 a 10^{11}
Fenoles	10^9 a 10^{10}
Compuestos orgánicos con nitrógeno	10^8 a 10^{10}
Aromáticos	10^8 a 10^{10}
Cetonas	10^9 a 10^{10}
Alcoholes	10^8 a 10^9
Alcanos	10^6 a 10^9

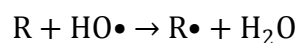
(Rodríguez 2003)

Los AOPs descomponen el cromóforo del tinte por lo que posteriormente se realiza la decoloración completa, esto lo hace un proceso adecuado para grandes volúmenes de agua residual textil, e incluso para emplear las aguas residuales como aguas grises disminuyendo la liberación de compuestos tóxicos al ambiente y costos (Amin, y otros 2008). Durante los AOPs se dan las siguientes reacciones donde R es el compuesto orgánico reactante (Stasinakis 2008).

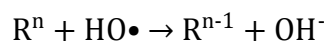
Ecuación 1



Ecuación 2



Ecuación 3



Una vez generados los radicales hidroxilo pueden atacar a los compuestos orgánicos mediante una adición radicalar (Ecuación 1), abstracción de hidrógeno (Ecuación 2) y transferencia de electrones (Ecuación 3) (Stasinakis 2008). Además de la variedad de mecanismos de acción se debe tomar en cuenta el alto potencial de oxidación en comparación con los otros agentes oxidantes. Esto se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 3 Potencial oxidativo para agentes oxidantes convencionales

Agente oxidante	Potencial de oxidación electroquímica (EOP), V	EOP relativo al cloro
Flúor	3.06	2.25
Radical hidroxilo	2.80	2.05
Oxígeno (atómico)	2.42	1.78
Ozono	2.08	1.52
Peróxido de hidrógeno	1.78	1.30
Hipoclorito	1.49	1.10
Cloro	1.36	1.00
Dióxido de cloro	1.27	0.93
Oxígeno (molecular)	1.23	0.90

(Al-Kdasi, y otros 2004)

Entre las ventajas del método se encuentra la falta de productos secundarios así como una tasa alta de eficiencia en el proceso (Kos y Perkowski 2003). Además los radicales $\text{HO}\bullet$ son selectivos al atacar lo cual es un atributo muy deseado para los agentes oxidantes. Su versatilidad se ve favorecida por los distintos mecanismos de acción de los radicales como se señaló anteriormente (Al-Kdasi, y otros 2004).

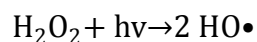
El proceso posee también varias desventajas, como la imposibilidad de emplear la luz solar como fuente de radiación UV debido a que la longitud de onda necesaria para llevar a cabo la reacción no se encuentra dentro del espectro de la luz solar (Stasinakis 2008). Además se debe tomar en cuenta que el peróxido de hidrógeno tiene poca absorbancia en la longitud de onda de la radiación UV, mientras que la matriz de agua absorbe mayor energía UV por lo que se podría dar pérdida de energía al tratar de irradiar al peróxido de hidrógeno. Es importante notar que se requieren reactores especiales para la iluminación UV además de que se debe dar un tratamiento posterior al peróxido de hidrógeno residual (Stasinakis 2008).

La producción de radicales hidroxilo se puede acelerar al combinar O_3 , H_2O_2 , TiO_2 , radiación UV, irradiación de rayo de electrones así como ultrasonido (Al-Kdasi, y otros 2004). Usualmente se necesita una combinación de agentes oxidantes fuertes como el H_2O_2 y el O_3 , con catalizadores como iones de metales de transición además de irradiación que puede ser ultravioleta o visible, entre otras (Stasinakis 2008). Para la oxidación de aguas residuales de la industria textil son las combinaciones $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, O_3/UV y $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ las más prometedoras (Al-Kdasi, y otros 2004).

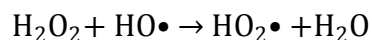
VI. COMBINACIÓN H₂O₂/UV

El proceso que emplea H₂O₂ se inicia con la inyección de H₂O₂ y el proceso de mezclado seguido por un reactor equipado con una lámpara UV (Al-Kdasi, y otros 2004) a una longitud de onda menor o igual a 400 nm (Rodríguez 2003). La radiación UV se emplea para romper el enlace O-O en el peróxido de hidrógeno y generar el radical hidroxilo. Se siguen las siguientes reacciones:

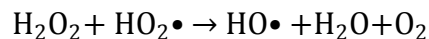
Ecuación 4



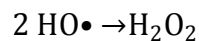
Ecuación 5



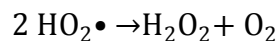
Ecuación 6



Ecuación 7



Ecuación 8



Ecuación 9



2004)

La etapa limitante del proceso de reacción es la Ecuación 7, por lo que se debe seleccionar la concentración adecuada de peróxido de hidrógeno con el propósito de aumentar la velocidad de reacción. Si bien la Ecuación 4 pareciera indicar que a mayor concentración de peróxido de hidrógeno se producirá una mayor cantidad de radical hidroxilo, sin embargo un exceso de peróxido de hidrógeno provoca la reacción con un

radical hidroxilo produciendo $\text{HO}_2\bullet$ como se puede notar en la Ecuación 85 (Al-Kdasi, y otros 2004).

Se deben tomar en cuenta varios factores que influyen en la tasa de velocidad de reacción. Entre ellos se encuentra la concentración inicial del compuesto objetivo, la cantidad de peróxido de hidrógeno empleada, el pH del agua residual, la presencia de bicarbonato y el tiempo de reacción (Mokrini, Oussi y Esplugas 1997). La tasa de velocidad de reacción es inversamente proporcional a la concentración inicial del contaminante, por lo que se debe optimizar la dilución del agua residual, así como la concentración del peróxido de hidrógeno (Stasinakis 2008). Sin embargo se debe considerar la absorbancia de la solución ya que, si es muy fuerte, la solución puede competir con el peróxido de hidrógeno por la radiación, es por ello que no se recomienda su aplicación en aguas opacas (Rodríguez 2003).

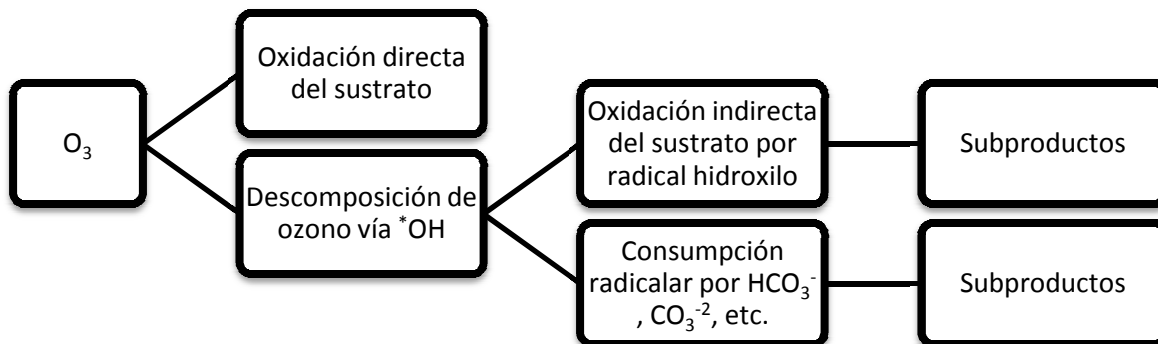
VII. OZONIZACIÓN (O₃)

La ozonización se ha usado desde hace ya varias décadas para el tratamiento de aguas residuales a modo de una esterilización terciaria (Greene, y otros 1999). A pesar de que el proceso de ozonización se basa en mecanismos complicados y depende de muchos parámetros, éste sigue siendo un método económico para el tratamiento de agua potable y agua residual, con un potencial enorme a nivel industrial (Gottschalk, Libra y Saupe 2010).

El ozono se produce cuando moléculas de oxígeno se disocian por una fuente de energía en átomos de oxígeno y posteriormente colisionan con una molécula de oxígeno, formando así el gas inestable llamado ozono (EPA 1999). En condiciones estándar de temperatura y presión tiene una baja solubilidad en agua y es inestable, con una vida promedio de unos cuantos minutos (Rodríguez 2003). Es por ello que el ozono se debe producir en el sitio de tratamiento, esto se logra incorporando una corriente de alto voltaje alternante a través de una zona de descarga dieléctrica que contiene el gas oxígeno (EPA 1999).

El ozono puede reaccionar con las sustancias de dos maneras diferentes: directa e indirectamente. Cada vía de reacción produce distintos productos y se rigen por distintos tipos de cinéticas (Gottschalk, Libra y Saupe 2010). La oxidación directa con ozono acuoso es relativamente lenta en comparación con la vía indirecta, sin embargo la concentración de ozono acuoso es relativamente alta, mientras que la reacción con radicales hidroxilo es rápida pero con una concentración menor de radicales hidroxilo (EPA 1999). La combinación de ambas vías dependerá de la naturaleza de los compuestos presentes en la solución, del pH del medio y de la dosis de ozono (Contreras Iglesias 2002).

Figura 1 Reacciones de oxidación de los compuestos durante la ozonización



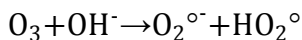
(EPA 1999)

En la vía directa el ozono reacciona a través de un ataque electrofílico a las posiciones con mayor densidad electrónica de los contaminantes disueltos. Esta vía se sigue usualmente cuando hay contaminantes como fenoles, fenolatos o compuestos tio. Este tipo de reacciones se lleva a cabo mediante la ozonólisis de un doble enlace o ataque a centros nucleofílicos, donde obtenemos aldehídos, cetonas o ácidos carboxílicos a partir de dobles enlaces, amidas a partir de nitrilos, etc (Contreras Iglesias 2002). La oxidación directa es una reacción selectiva con constantes de reacción lentas (Gottschalk, Libra y Saupe 2010). A menor pH esta vía se verá más favorecida (EPA 1999), a un pH menor a 4 es la vía directa la que predomina (Contreras Iglesias 2002). El ozono reaccionará más fácilmente con contaminantes acuosos orgánicos con una mayor densidad electrónica. Además esta reacción se ve favorecida por compuestos aromáticos y alifáticos con sustituyentes donadores de electrones como los grupos hidroxilo o amino (Gottschalk, Libra y Saupe 2010).

La vía indirecta involucra la participación de radicales, por lo cual también se le denomina vía radicalar (Gottschalk, Libra y Saupe 2010). Esta vía es predominante a un pH mayor a 10 y en combinación con moléculas menos reactivas como hidrocarburos alifáticos, ácidos carboxílicos, bencenos o clorobencenos (Contreras Iglesias 2002). El mecanismo de reacción radicalar del ozono se divide en tres pasos (los 3 pasos usuales para cualquier reacción radicalar): la iniciación, la propagación en cadena y la terminación.

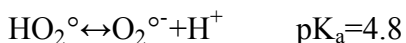
La iniciación se basa en la reacción entre iones hidroxilo y el ozono, y esto lleva a la formación del anión radical superóxido $O_2^{\circ-}$ y un radical hidroperoxilo HO_2° según la siguiente reacción:

Ecuación 10



El radical hidroperoxilo se encuentra en un equilibrio ácido-base como se muestra a continuación:

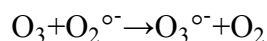
Ecuación 11



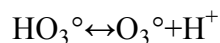
(Gottschalk, Libra y Saupe 2010)

La cadena radical surge cuando el anión radical ozónido ($O_3^{\circ-}$) se forma a partir de la reacción entre el ozono y el anión radical superóxido se descompone inmediatamente en un radical OH de la siguiente forma:

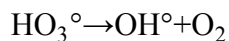
Ecuación 12



Ecuación 13



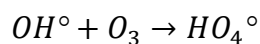
Ecuación 14



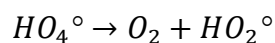
(Gottschalk, Libra y Saupe 2010)

El radical OH puede reaccionar de la siguiente manera:

Ecuación 15



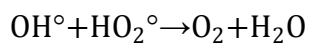
Ecuación 16



Es el posterior decaimiento del radical OH el que produce los mismos productos que los de la Ecuación 12, permitiendo así la continuidad de la cadena de reacción (Gottschalk, Libra y Saupe 2010).

La etapa final de la reacción es la terminación, la cual se da debido a que algunas de las sustancias, ya sea orgánicas o inorgánicas, que reaccionan con el radical OH forman radicales secundarios que no producen HO_2°/O_2° , los cuales usualmente terminan la cadena de reacción inhibiendo la degradación del ozono. Otra forma de terminar la cadena de reacción sería con la reacción entre dos radicales, por ejemplo:

Ecuación 17

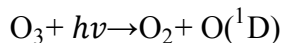


(Gottschalk, Libra y Saupe 2010)

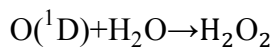
VIII. COMBINACIÓN UV/O₃

En el proceso UV/O₃ la energía proveniente de la radiación UV interactúa con las moléculas de ozono de la siguiente manera:

Ecuación 18



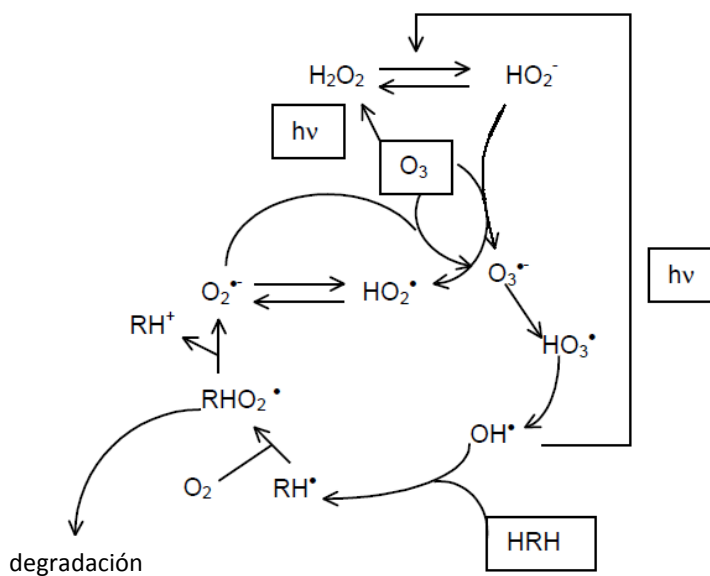
Ecuación 19



(Martínez Domínguez 2010)

Las lámparas ultravioleta empleadas deben tener una radiación máxima de 254nm para una fotólisis eficiente (Gottschalk, Libra y Saupe 2010). Se ha demostrado que la ozonización combinada con radiación ultravioleta es mucho más efectiva para remover compuestos orgánicos que la ozonización simple. Esto se debe a que la radiación UV acelera la descomposición del ozono produciendo más radicales libres, aumentando así la tasa de ozonización (Shang, y otros 2007).

Figura 2 Esquema del mecanismo de degradación a través del proceso O₃/UV



Este sistema contiene tres componentes que ya sea producen radicales OH y/o oxidan los compuestos para siguientes reacciones, estos tres componentes son: la radiación UV, el ozono y el peróxido de hidrógeno. Si el contaminante absorbiera la energía a la longitud de onda emitida se daría una fotólisis directa (Gottschalk, Libra y Saupe 2010). Si se toma en cuenta que la fotólisis mediante peróxido de hidrógeno es sumamente lenta comparada con la tasa en que el ozono se descompone, tenemos que la tasa de fotólisis mediante peróxido de hidrógeno se puede despreciar (Contreras Iglesias 2002).

Se ha estudiado la eficiencia del proceso con distintos compuestos aromáticos, y se encontró, por ejemplo, que el proceso O_3/UV es más efectivo que el sistema UV/H_2O_2 para la degradación de p-cloronitrobenceno (Contreras Iglesias 2002).

IX. COMBINACIÓN O₃/H₂O₂ (PEROXONO)

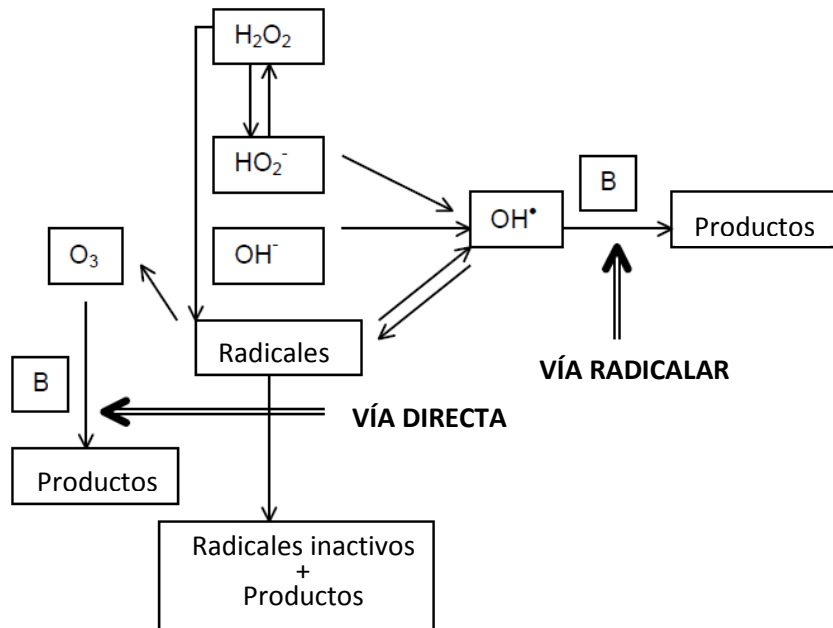
Para aumentar la producción del radical hidroxilo se puede agregar peróxido de hidrógeno y ozono para acelerar la descomposición de ozono en el agua residual. Esta reacción es dependiente del pH, a un pH el peróxido de hidrógeno reacciona lentamente con el ozono, mientras que a pH de 5 o más la reacción ocurre más fácilmente. A un pH más elevado se descompone el peróxido de hidrógeno aún a concentraciones pequeñas, y se disocia en iones HO₂⁻ que pueden iniciar la descomposición del ozono de una manera más efectiva que el ion OH⁻. Es por ello que se deben tener consideraciones especiales del pH del efluente. Estudios indican que a un pH elevado, de 11.5, se da una absorción del 74% de ozono, mientras que a pH de 2.5 la absorción del ozono es solamente del 11% (Al-Kdasi, y otros 2004).

En el proceso con peroxono el ozono residual tiene una vida media corta, por lo que la oxidación es más reactiva y mucho más rápida esto lo hace un proceso idóneo para el tratamiento de compuestos orgánicos (Lloyd Russell 2006). Además el ozono es reactivo con grupos insaturados y anillos aromáticos produciendo productos de oxidación parcial, entre los cuales se encuentran los ácidos, aldehídos y cetonas (Acar 2004). Sin embargo con el peroxono la biodegradabilidad del agua aumenta. Es por ello que el peroxono se emplea como oxidante de orgánicos difíciles de tratar como compuestos de sabor y aroma (EPA 1999).

Al agregar peróxido de hidrógeno, la producción neta de radicales hidroxilo libres es de 1.0 mol de radical hidroxilo por mol de ozono (EPA 1999). A pesar de que el mecanismo de la acción del ozono en un medio acuoso es complejo se tienen dos propuestas de reacción del ozono que son ampliamente aceptados, en uno de ellos la molécula de ozono ataca directamente a la molécula del compuesto orgánico, esta ruta se denomina ataque directo, mientras que el ataque indirecto requiere la presencia del radical hidroxilo. Son varios factores los que afectan la vía dominante en el sistema. Entre estos factores se incluye el pH, las sales disueltas, así como el tipo de sustrato, por ejemplo un sustrato fácilmente oxidable y condiciones ácidas favorecen la oxidación

directa, lo contrario ocurre al emplear solutos recalcitrantes a condiciones básicas (Acar 2004).

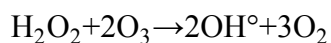
Figura 3 Esquema del mecanismo de reacción en agua a través del proceso de peroxono



(Contreras Iglesias 2002)

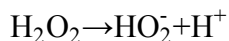
La reacción global del proceso del peroxono es la siguiente:

Ecuación 20

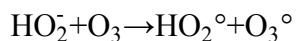


A esta reacción le siguen dos reacciones más:

Ecuación 21



Ecuación 22



Ya que este sistema no depende de la radiación UV para activar las moléculas de ozono y de peróxido de hidrógeno su mayor ventaja está en que se puede aplicar a aguas turbias sin problemas (Contreras Iglesias 2002).

La diferencia clave entre los procesos mediante el uso de ozono y de peroxono es que el proceso de ozono depende de la oxidación directa del ozono acuoso mientras que el peroxono depende principalmente de la oxidación con radical hidroxilo (EPA 1999).

Este tratamiento se ha usado para el tratamiento de suelos, agua subterránea, así como agua residual contaminados con compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos de petróleo, solventes clorados, metales, entre otros (Xu y Goddard III 2002). En Alemania y Estados Unidos se ha empleado este método para remover el color, sabor y residuos de pesticidas del agua municipal potable (Acar 2004).

A menudo se considera que el tratamiento de aguas residuales con ozono y con peroxono produce resultados iguales o similares, sin embargo como se puede observar en la tabla a continuación, la habilidad de descomponer ciertos compuestos varía considerablemente entre los dos tipos de procesos (EPA 1999).

Tabla 4 Comparación entre oxidación por ozono y peroxono

Proceso	Ozono	Peroxono
Tasa de descomposición del ozono	Descomposición normal produciendo radical hidroxilo como producto intermediario	Descomposición acelerada que aumenta la concentración del radical hidroxilo a
Residual de ozono	5-10 minutos	Muy corto tiempo debido a reacción rápida
Vía de oxidación	Usualmente oxidación de ozono directa y acuosa	Principalmente oxidación del radical hidroxilo
Habilidad de oxidar hierro y manganeso	Excelente	Menos efectiva
Habilidad de oxidar compuestos de sabor y olor	Variable	Buena, el radical hidroxilo es más reactivo que el ozono
Habilidad de oxidar compuestos clorados	Pobre	Buena, el radical hidroxilo es más reactivo que el ozono
Habilidad de desinfección	Excelente	Buena

(EPA 1999)

Entre las ventajas de usar el método de peroxono en vez del de ozono está el hecho de que la oxidación es más reactiva y más rápida en el proceso con peroxono comparado con el proceso de ozono molecular. Además el peroxono es efectivo al oxidar compuestos orgánicos difíciles de tratar como por ejemplo compuestos de olor y sabor y compuestos halogenados. Un beneficio sumamente importante es que el proceso con peroxono tiene tendencia de transformar compuestos orgánicos de carbono en una forma más biodegradable (EPA 1999).

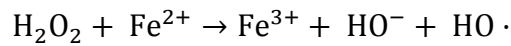
Si bien el proceso de peroxono tiene numerosas ventajas sobre el de ozono se debe tomar en cuenta que el peroxono es un oxidante sumamente fuerte, por lo que el contacto con él es sumamente peligroso. Además si bien se puede almacenar el peróxido en la planta de tratamiento, se deteriora gradualmente aún en las mejores condiciones de almacenamiento. Si el objetivo del tratamiento es proveer desinfección u oxidar hierro y manganeso es importante notar que el proceso con ozono es considerablemente más efectivo para esos propósitos (EPA 1999).

X. PROCESO FENTON

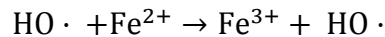
El proceso Fenton se basa en el empleo del reactivo Fenton para la oxidación de diversas sustancias. El reactivo Fenton es una combinación de peróxido de hidrógeno con una sal ferrosa, se ha demostrado que es un oxidante sumamente efectivo al ser aplicado a sustratos orgánicos de diversos tipos (Walling 1975). Sin embargo son los radicales hidroxilo generados por el reactivo Fenton los que realmente son capaces de oxidaciones no específicas y los que le dan la gran utilidad a este reactivo (Ferrokhi, y otros 2003).

La estequiometría de la reacción es la siguiente:

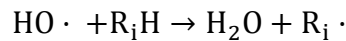
Ecuación 23



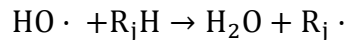
Ecuación 24



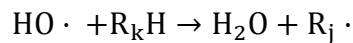
Ecuación 25



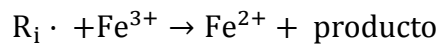
Ecuación 26



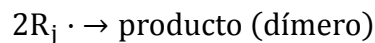
Ecuación 27



Ecuación 28



Ecuación 29



Ecuación 30



En la estequiometría propuesta se asume la formación de tres tipos posibles de radicales: $R_i \cdot$, $R_j \cdot$ y $R_k \cdot$, los cuales luego se pueden ver sometidos a oxidación, regenerando Fe^{2+} y propagando así la cadena redox, o también pueden dimerizarse o reducirse (Walling 1975).

La eficiencia del proceso Fenton depende de las concentraciones de peróxido de hidrógeno y de Fe^{2+} , el pH de la reacción (Barbusinski y Filipek, Use of Fenton's Reagent for Removal of Pesticides from Industrial Wastewater 2001), la temperatura y el oxígeno disuelto (Chang, Hsieh, y otros 2008). El pH recomendado oscila en un rango de 3 a 5 (Barbusinski y Filipek 2001). A un pH menor a 2 el peróxido de hidrógeno no se descompone por el ion ferroso por lo que no hay producción de radicales hidroxilo. A un pH mayor a 4 disminuye la tasa de degradación ya que disminuye la fracción disuelta de hierro así como el potencial de oxidación del radical hidroxilo (Ferrokhi, y otros 2003). Resultados experimentales han demostrado que las mejores condiciones de reacción para el Proceso Fenton es una concentración de peróxido de hidrógeno de 8.5mM, una concentración de Fe^{2+} de 1.25mM, una proporción Fe^{2+}/H_2O_2 de 0.147 y un pH de 3 para obtener una constante de formación de radical hidroxilo de aproximadamente $1.12 \times 10^{11} M^{-1}s^{-1}$ (Chang, Hsieh, y otros 2008).

El Proceso Fenton es muy efectivo para el tratamiento de aguas residuales con una amplia diversidad de compuestos, incluyendo aquellos aromáticos y alifáticos, tintes, pesticidas, y compuestos carcinogénicos (Barbusinski y Filipek 2001). El Proceso Fenton también se ha usado en medios no acuosos como la arena con una tasa de éxito en remoción de contaminantes del 97% (Millioli, Freire y Cammarota 2002).

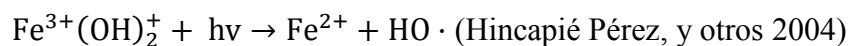
Entre las ventajas del método están la falta de energía necesaria para activar al peróxido de hidrógeno, lo cual a nivel económico representa un gran beneficio, sin embargo durante el proceso se produce una cantidad significativa de precipitado de $Fe(OH)_3$ además de la contaminación producida por el catalizador que se empleó como sal ferrosa. Actualmente se están investigando varios óxidos ferrosos como la hematita y ferrihidrita entre otros con el fin de disminuir las concentraciones de contaminantes (Barbusinski 2005).

XI. PROCESO FOTO-FENTON

El proceso Foto-Fenton se basa en el aumento de la velocidad de degradación de sustancias orgánicas al aplicar radiación UV-Vis al proceso de Fenton. En el proceso Foto-Fenton se pueden emplear como fuentes la luz solar (UV-Vis) o fuentes artificiales de luz UV como lámparas de xenón o mercurio (Silva A., y otros 2009). Este proceso permite el uso de longitudes de onda desde 300nm hasta la región visible (Hincapié Pérez, y otros 2004).

En esta variación del proceso de Fenton existe una fuente adicional de radical hidroxilo así como de regeneración de Fe^{2+} que se da a través de una fotólisis de acuerdo a la siguiente reacción:

Ecuación 31



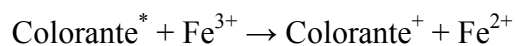
El Fe^{2+} generado a partir de la radiación permite la continuidad de la cadena redox, aumentando el ciclo de producción de radicales hidroxilo (Hincapié Pérez, y otros 2004).

Además la radiación visible aumenta el ataque a la materia orgánica mediante las siguientes reacciones:

Ecuación 32



Ecuación 33



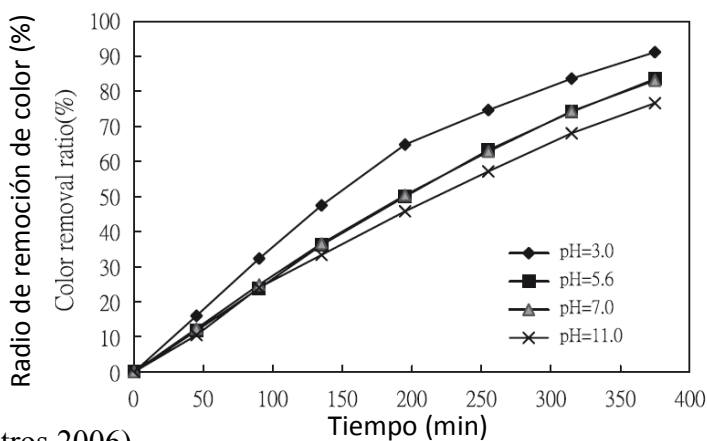
Esta variación del proceso Fenton no representa mayor gasto monetario dado la opción de emplear radiación solar (Chacón Castillo, y otros 2004).

XII. FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA (UV/TiO₂)

Este tipo de fotocatalisis se clasifica como heterogénea ya que hay dos fases activas: una sólida y una líquida. Si bien se han analizado y probado varios catalizadores, el dióxido de titanio ha demostrado ser la mejor opción para fotocatalisis (Rodríguez 2003). El dióxido de titanio tiene una buena capacidad para degradar compuestos orgánicos mediante la oxidación, además remueve metales pesados al reducirlos. El dióxido de titanio (TiO₂) es relativamente económico, insoluble en agua, no es venenoso (Samarghandi, y otros 2007) y es foto estable (Chang, Chang, y otros 2010). Además el TiO₂ es un excelente fotocatalizador para producir la mineralización completa de contaminantes tanto en agua como en agua residual (Rahmani, y otros 2009). El principal inconveniente de este tipo de fotocatalisis es que el TiO₂ permanece en suspensión dentro de la solución, por lo que se requiere una posterior filtración o centrifugación para aislarlo, lo cual incrementa los costos y las dificultades en el tratamiento (Liu, y otros 2006).

Este proceso de fotocatalisis es dependiente del pH, la concentración inicial del contaminante, tasa de flujo y la intensidad de luz. A menor pH mejor actividad fotocatalítica (Liu, y otros 2006).

Figura 4 Tiempo vs. Radio de remoción de color a valores de pH distintos (concentración de 50mg/L, temperatura 25°C, tasa de flujo 0.82 cm/s, e intensidad de luz 3.15 mW/cm²)



(Liu, y otros 2006)

XIII. CUADRO COMPARATIVO DE PROCESOS

Método	Ventajas	Desventajas
Foto-Fenton	Se pueden emplear como fuentes la luz solar (Vis-UV) o fuentes artificiales de luz UV. Aumenta el ciclo de producción de radicales hidroxilo.	En caso de emplearse fuente artificial de luz UV aumenta el costo y se debe modificar el área de tratamiento.
Fenton	Muy efectivo para el tratamiento de aguas residuales con una amplia diversidad de compuestos, incluyendo aquellos aromáticos y alifáticos, tintes, pesticidas, y compuestos carcinogénicos No requiere energía para activar el H ₂ O ₂ por lo que disminuyen los costos.	La eficiencia depende de las concentraciones de peróxido de hidrógeno y de Fe ²⁺ Sumamente dependiente del pH. Produce una cantidad significativa de precipitado de Fe(OH) ₃ . Contaminación producida por el catalizador que se empleó como sal ferrosa.
H ₂ O ₂ /O ₃	El peroxono se emplea como oxidante de orgánicos difíciles de tratar como compuestos de sabor y aroma. Acelera el proceso de ozonización. Se puede aplicar a aguas turbias sin problemas. Excelente para la oxidación de compuestos clorados.	Se deben tener consideraciones especiales del pH del efluente. El ozono se debe producir in situ.
UV/O ₃	Es mucho más efectivo para remover compuestos orgánicos que la ozonización simple. Es más efectivo que el sistema UV/H ₂ O ₂ para la degradación de p-cloronitrobenceno.	Requiere la instalación de equipos como lámpara de UV y la producción de ozono.
O ₃	Método económico. Debido a sus dos mecanismos de reacción se puede atacar una amplia gama de compuestos. Excelente para oxidar hierro y manganeso. Excelente para desinfección.	El ozono se debe producir in situ. El mecanismo de reacción así como la velocidad de reacción depende del pH de la solución.
H ₂ O ₂ /UV	Bajo costo. Facilidad de instalación. Portabilidad del sistema. Capacidad de almacenamiento de reactivos.	Se debe seleccionar la concentración adecuada de peróxido de hidrógeno. Se debe optimizar la dilución del agua residual. No se recomienda su uso en aguas opacas.
UV/TiO ₂	Buen a capacidad para degradar compuestos orgánicos mediante la oxidación, además remueve metales pesados al reducirlos.	Requiere una posterior filtración o centrifugación para aislar los residuos. Sumamente dependiente del pH.

XIV. CONCLUSIONES

- A. Los procesos de oxidación avanzada son métodos viables para el tratamiento de agua coloreada en cuerpos de agua ya que se pueden ajustar a las necesidades de presupuesto, compuestos a tratarse y ubicación de la planta de tratamiento.
- B. Para la industria textil guatemalteca se recomienda una combinación de H_2O_2/UV por su bajo costo y facilidad de instalación, además de la capacidad de almacenamiento de reactivos. Sin embargo se debe tomar en cuenta que se deben hacer varios ensayos preliminares para encontrar la concentración de peróxido de hidrógeno y la dilución de agua residual que optimice el procedimiento.
- C. El proceso de oxidación avanzada más efectivo para el tratamiento de aguas residuales textiles con tintes de gran complejidad es el Foto-Fenton ya que combina las ventajas del proceso Fenton que se traduce a una alta efectividad para el tratamiento de aguas residuales con una amplia diversidad de compuestos, incluyendo aquellos aromáticos y alifáticos, tintes, pesticidas, y compuestos carcinogénicos; con el aumento del ciclo de producción de radicales hidroxilo otorgado por la radiación UV-Vis. Se debe considerar el tratamiento posterior a este AOP ya que produce precipitados y puede producir contaminación de la sal empleada.

XV. RECOMENDACIONES

- A. Los AOPs se deben emplear como método complementario en una planta de tratamiento, no como método único para mejorar la calidad del agua. Esto se debe a que requiere de tratamiento primario, secundario y terciario para alcanzar su máxima efectividad.

- B. La planta modelo del Jardín Botánico Nacional debe funcionar con un caudal de agua relativamente bajo para garantizar la mayor efectividad en tratamiento. En este caso se deberá tratar el cuerpo de agua cuyo uso exclusivo será el riego de las plantas.

- C. Se recomienda emplear el agua no tratada como muestra de la contaminación actual de la cuenca, por lo que se deben hacer mediciones periódicas de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tanto del agua ya tratada como del agua sin tratar para crear conciencia del nivel de contaminación de la cuenca y de los beneficios que se pueden obtener con un correcto tratamiento de aguas.

XVI. BIBLIOGRAFÍA

I.Acar, Ebru. *Oxidation of Acid Red 151 solutions by peroxone (O₃/H₂O₂) process.* Ankara: Middle East Technical University, 2004.

II.Al-Kdasi, Adel, Azni Idris, Katayon Saed, y Chuah Teong Guan. «TREATMENT OF TEXTILE WASTEWATER BY ADVANCED OXIDATION PROCESSES – A REVIEW.» *Global Nest: the International Journal* 6, n° 3 (2004): 222-230.

III.Amin, Heba, Ashraf Amer, Anwer El Fecky, y Ibrahim Ibrahim. «Treatment of textile waste water using H₂O₂/UV system.» *Physicochemical Problems of Mineral Processing* (Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej) 42 (2008): 17-28.

IV.Arévalo, Eduardo, y otros. «Reuso del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales del campus central de la Universidad Rafael Landívar para el riego de los jardines del campus.» *Revista Electrónica No.13*, Julio de 2009: 53-93.

V.Barbusinski, K. «The Modified Fenton Process for Decolorization of Dye Wastewater.» *Polish Journal of Environmental Studies* 14, n° 3 (2005): 281-285.

VI.Barbusinski, K., y K. Filipek. «Use of Fenton's Reagent for Removal of Pesticides from Industrial Wastewater.» *Polish Journal of Environmental Studies* 10, n° 4 (2001): 207-212.

VII.Chacón Castillo, Juan Matías, María Teresa Leal Ascencio, Erick R. Bandala Gonzáles, y Manuel Sánchez Zarza. «Mineralización de colorantes por foto-fenton y energía solar.» *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. San Juan: AIDIS, 2004.

VIII.Chang, Chen-Yu, Yu-Jie Chang, Yung-Hsu Hsieh, Ching-Hsing Lin, y Shih-Hung Yen. «Azo dye-Yellow 17 wastewater Photocatalytic degradation of by UV/TiO₂ combined with ultrasonic procedure.» *Advanced Materials Research* 123-125 (2010): 11-14.

IX.Chang, Chen-Yu, Yung-Hsu Hsieh, Kai-Yuan Cheng, Ling-Ling Hsiesh, Ta-Chih Cheng, y Kuo-Shan Yao. «Effect of pH on Fenton process using estimation of hydroxyl radical with salicylic acid as trapping reagent.» *Water Science & Technology* (IWA Publishing) 58, n° 4 (2008): 873-879.

X.Contreras Iglesias, Sandra. *Degradation and Biodegradability enhancement of nitrobenzene and 2,4-dichlorophenol by means of advanced oxidation processes based on ozone*. Tesis de Doctorado, Departament D'Enginyeria Química I Metal·Lúrgia, Facultat de Química, Barcelona: Universitat de Barcelona, 2002.

XI.EPA. *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual*. Guidance Manual, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington: EPA, 1999, 346.

XII.EPA. *Wastewater Technology Fact Sheet: Ozone Disinfection*. Fact Sheet, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington: EPA, 1999, 7.

XIII.Ferrokhi, M., A. R. Mesdaghinia, S. Naseri, y A. R. Yazdanbakhsh. «Oxidation of Pentachlorophenol by Fenton's Reagent.» *Iranian Journal of Public Health* 32, n° 1 (2003): 6-10.

XIV.Gottschalk, Cristiane, Judy Ann Libra, y Adrian Saupe. *Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and Its Applications*. Segunda Edición. Weinheim: WILEY-VCH, 2010.

XV.Greene, Kyle, Mike Zelen, Harold Kinasewich, Chris Kinasewich, y Todd Webb. «Ozone based wastewater treatment solutions.» *Water and Wastewater*. 1999. <http://www.waterandwastewater.com/blog/archives/PDFs/OzoneBasedWastewaterTreatment.pdf> (último acceso: 14 de Julio de 2010).

XVI.Hincapié Pérez, Margarita, Gustavo Antonio Peñuela Mesa, Isabel Oller, Manuel Ignacio Maldonado, y Sixto Malato R. «Degradación de atrazina en agua por fotocatalisis y fotofenton en una planta piloto solar.» *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. San Juan: AIDIS, 2004.

XVII.IARNA. «Evaluación de Recursos de Agua de Guatemala.» *Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA), Guatemala*. Junio de 2000. http://www.infoiarina.org.gt/media/file/areas/agua/documentos/nac/%285%29%20Evaluacion_recursos_agua_Guatemala.pdf (último acceso: 28 de Abril de 2010).

XVIII.IGN. «Estudio Morfométrico de Cuencas - Valle de Guatemala: Río Las Vacas hasta Estación San Antonio Las Flores (Cuenca Norte) y Río Michatoya hasta Estación Jurún (Cuenca Sur).» *Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de Guatemala*. Agosto de 1972. http://www.infoiarina.org.gt/guateagua/subtemas/7/Est_morfhh/ESTUDIO_MORFOMETRICO_RIOS_LAS_VACAS_Y_MICHATOYA.pdf (último acceso: 1 de Mayo de 2010).

XIX.Kos, Lech, y Jan Perkowski. «Decolouration of Real Textile Wastewater with Advanced Oxidation Processes.» *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* (Institute of Biopolymers and Chemical Fibres) 11, n° 4 (Octubre/Diciembre 2003): 81-85.

XX.Liu, Chin-Chuan, Yung-Hsu Hsieh, Pao-Fan Lai, Chia-Hsin Li, y Chao-Lang Kao. «Photodegradation treatment of azo dya wastewater by UV/TiO₂ process.» *Dyes and Pigments* 68 (2006): 191-195.

XXI.Lloyd Russell, David. *Practical wastewater treatment*. Primera edición. Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

XXII.López Choc, Fernando. «Evaluación de las crecidas provocadas por el Huracán Mitch en la cuenca del Lago de Amatitlán.» *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental de la Organización Panamericana de la Salud*. Septiembre de 1999. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/guatemala21/11lagoamat.pdf> (último acceso: 27 de Abril de 2010).

XXIII.Martínez Domínguez, Gerardo Paolo. *Descontaminación de agua de lavado de suelo contaminado con plaguicidas mediante procesos avanzados de oxidación*. Cholula, Puebla: Universidad de las Américas Puebla, 2010.

XXIV. Millioli, Valéria S., Denize D.C. Freire, y Magali C. Cammarota. «Testing the efficiency of Renton's Reagent in treatment of petroleum-contaminated sand.» *Engenharia Térmica*, 2002: 44-47.

XXV. Mokrini, A., D. Oussi, y S. Esplugas. «Oxidation of aromatic compounds with UV radiation/oxone/hydrogen peroxide.» *Water Science and Technology* (IWA Publishing) 35, n° 4 (1997): 95-102.

XXVI. Oliva Hernández, Bessie Evelyn, y Juan Francisco Pérez Sabino. «La contaminación del Agua y su Impacto en la Salud en Guatemala.» *Fundación Nueva Cultura del Agua*. 8 de Diciembre de 2005. <http://www.fnca.eu/fnca/america/docu/18z3.pdf> (último acceso: 27 de Abril de 2010).

XXVII. Rahmani, A.R., M. R. Samarghandi, M. T. Samadi, y F. Nazemi. «Photocatalytic Disinfection of Coliform Bacteria Using UV/TiO₂.» *Journal of Research in Health Sciences* 9, n° 1 (2009): 1-6.

XXVIII. Rodríguez Fernández-Alba, Antonio, Pedro Letón García, Roberto Rosal García, Miriam Dorado Valiño, Susana Villar Fernández, y Juana M. Sanz García. «Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.» *Vigilancia Tecnológica* (CITME) 2 (2006).

XXIX. Rodríguez Martínez, J., W.D. Coronado Valdez, S.Y. Martínez Amador, y Y. Garza García. «Cinéticas de desnitrificación en reactores Batch durante el tratamiento de aguas residuales.» *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental de la Organización Panamericana de la Salud*. Abril de 2002. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/019.pdf> (último acceso: 29 de Abril de 2010).

XXX. Rodríguez, Miguel. *Fenton and UV-vis based advanced oxidation processes in wastewater treatment: Degradation, mineralization and biodegradability enhancement*. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2003.

XXXI. Salas, Henry. «Asesoría sobre la eutroficación y recuperación del lago Amatitlán.» *Informe técnico 380 CEPIS*. Guatemala, 4 de Abril de 1991.

- XXXII. Samarghandi, M. R., J. Nouri, A. R. Mesdaghinia, A. H. Mahvi, S. Nasser, y F. Vaezi. «Efficiency removal of phenol, lead and cadmium by means of UV/TiO₂/H₂O₂ processes.» *International Journal of Environmental Science and Technology* 4, n° 1 (2007): 19-25.
- XXXIII. Shang, Neng-Chou, y otros. «Oxidation of methyl methacrylate from semiconductor wastewater by O₃ and O₃/UV processes.» *Journal of Hazardous Materials* 147 (2007): 307-312.
- XXXIV. Silva A., Sandra Milena, Julián Trujillo S., Luis Guillermo Aguilar M., y Margarita Hincapié P. «Tratamiento de contaminantes orgánicos por Foto Fenton con luz artificial.» *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 8 (2009): 53-62.
- XXXV. Stasinakis, A.S. «Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment - A mini review.» *Global NEST Journal* 10, n° 3 (2008): 376-385.
- XXXVI. Tetzaguic Car, Carlos. *Sistematización de la información de calidad del agua del Lago de Amatitlán con parámetros que determinan su contaminación secuencial*. Guatemala: Facultad de Ingeniería. USAC, 2003.
- XXXVII. Walling, Cheves. «Fenton's Reagent Revisited.» *Accounts of chemical research* 8, n° 4 (Abril 1975): 125-131.
- XXXVIII. Xu, Xin, y William A. Goddard III. «Peroxone chemistry: Formation of H₂O₃ and ring-(HO₂)(HO₃) from O₃/H₂O₂.» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 26 de Noviembre de 2002: 15308-15312.