

Oxidación avanzada: generando radicales oxidantes para la remoción de contaminantes recalcitrantes

Advanced oxidation: oxidants radicals generaration for recalcitrants
contaminants removal



<https://www.iagua.es/blogs/xavi-duran-ramirez/reutilizacion-agua-hay-vida-mas-alla-agricultura-industria-y-usos>

Marleth Roxana Garza Román^a, Francisco Raúl Carrillo Pedroza^b, Ma. De Jesus Soria Aguilar^b, Nallely Guadalupe Picazo Rodríguez^c.

^a Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Ing. J. Cárdenas Valdez S/N, Col. República, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

^b Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, Carretera 57, km 5, C. P. 25710, Monclova, Coahuila, México.

^c Instituto Tecnológico Superior de Monclova, Carretera 57, km 4.5, C.P. 25716, Monclova, Coahuila, México.

Correo electrónico: marleth.garza@uadec.edu.mx

Resumen

En los últimos años se han identificado en el medio ambiente una gran variedad de productos químicos nocivos en los efluentes procedentes de los procesos industriales. Estos productos químicos afectan a los seres humanos y a los ecosistemas acuáticos. En base a lo anterior se han estudiado diferentes tratamientos para estos efluentes industriales. Actualmente los procesos de oxidación avanzada (POA) ofrecen una alternativa eficaz para tratar estos contaminantes. Las tecnologías de oxidación avanzada generan la producción de radicales hidroxilo, los cuales producen cambios en la estructura química y degradan con facilidad contaminantes orgánicos recalcitrantes y ciertos contaminantes inorgánicos en las aguas residuales. Los POA pueden ser fotoquímicos (como vacío/UV/fotólisis, UV/peróxido de hidrógeno, UV/ozono, UV/ozono/ peróxido de hidrógeno, foto-Fenton, etc.) y no fotoquímicos (como Ozonización, ozono/peróxido de hidrógeno y proceso de Fenton, etc.). En el presente trabajo se muestra una amplia revisión de la eficiencia de los diferentes POA empleados en la eliminación de compuestos químicos nocivos presentes en aguas residuales.

Palabras clave: descomposición, radical hidroxilo, tratamiento de agua.

Abstract

In recent years, a wide variety of harmful chemicals have been identified in the environment in effluents from industrial processes. These chemicals affect humans and aquatic ecosystems. Based on the above, different treatments have been studied for these industrial effluents. Currently advanced oxidation processes (AOPs) offer an effective alternative to treat these contaminants. Advanced oxidation technologies generate the production of hydroxyl radicals, which produce changes in the chemical structure and easily degrade recalcitrant organic pollutants and certain inorganic pollutants in wastewater. AOPs can be photochemical (such as

vacuum UV photolysis, UV/hydrogen peroxide, UV/ozone, UV/ozone/hydrogen peroxide, photo-Fenton, etc.) and non-photochemical (such as Ozonation, ozone/hydrogen peroxide and process Fenton, etc.). This work shows a broad review of the efficiency of the different AOPs used in the elimination of harmful chemical compounds present in wastewater.

Keywords: decomposition, hydroxyl radical, water treatment.

Introducción

El agua es un recurso natural e indispensable para la vida y los ecosistemas, sin embargo este recurso es escaso, por lo que no toda la población tiene acceso al agua potable. Además un porcentaje del agua se utiliza para el desarrollo en la industria química, farmacéutica, agrícola, petroquímica, metalúrgica, textil, etc. Las cuales han producido un aumento en las aguas residuales (Cuerda-Correa y col., 2020).

Debido a lo anterior los procesos de oxidación avanzada desempeñan un papel muy importante en los tratamientos del agua (Ghime y Ghosh, 2020). Los cuales producen radicales hidroxilo, que generan cambios en la estructura química de los contaminantes orgánicos recalcitrantes, además de ciertos contaminantes inorgánicos, permitiendo que estos sean degradados con mayor facilidad en las aguas residuales (Deng y Zhao, 2015).

El objetivo del presente trabajo es comparar los diferentes métodos de oxidación, a fin de mostrar sus ventajas y desventajas frente a la oxidación y oxidación catalítica de los diferentes tipos de contaminantes.

Química de la oxidación avanzada

Forero y col. (2005) denominan procesos de oxidación avanzada (POA), cuando existe una combinación entre los procesos convencionales (tales como oxidación química, extracción líquido-líquido, absorción, ósmosis inversa, ultrafiltración, o tratamiento biológico), debido a que cuando trabajan por si solos, no pueden remover los compuestos orgánicos eficientemente. El proceso fisicoquímico de la oxidación avanzada involucra la generación y el uso de especies transitorias con un elevado poder oxidante como el radical hidroxilo ($\text{OH}\cdot$), el cual produce cambios favorables en la estructura química de los contaminantes permitiendo su degradación.

Los procesos de oxidación avanzada se clasifican en heterogéneos y homogéneo, los cuales se pueden dividir en dos grupos (Alabdraba y col., 2018):

- POA no fotoquímicos (como Ozonización, ozono/peróxido de hidrógeno y proceso de Fenton, etc.).
- POA fotoquímicos (como vacío UV fotólisis, UV/peróxido de hidrógeno, UV/ozono, UV/ozono /peróxido de hidrógeno, foto-Fenton, etc.).

Por otro lado, investigadores como Deng y Zhao (2015) también realizaron un estudio en donde clasificaron algunos de los procesos de oxidación avanzada, los cuales podemos observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de oxidación avanzada y otros mecanismos

Fuente: (Adaptada de Deng y Zhao, 2015).

Tipos de POA	Oxidante para oxidación avanzada	Otros mecanismos	
O ₃	OH•	Oxidación directa O ₃	
Principales Procesos de oxidación avanzada	O ₃ / H ₂ O ₂	Oxidación directa O ₃ Oxidación H ₂ O ₂	
	O ₃ / UV	Fotólisis UV	
	UV / TiO ₂	Fotólisis UV	
	UV / H ₂ O ₂	Fotólisis UV Oxidación H ₂ O ₂	
	Reacción de Fenton	OH•	Coagulación de hierro Adsorción inducida por lodos de hierro
	Reacción de foto-Fenton	OH•	Coagulación de hierro Adsorción inducida por lodos de hierro Fotólisis UV

Además, en algunos procesos de oxidación avanzada se utilizan oxidantes adicionales, los cuales varían según los efluentes que se desean eliminar. Algunos investigadores como Forero y col. (2005) los clasifican de acuerdo con la especie y potenciales de redox, como se muestra en la Tabla 2.

Especie	Eo (V, 25° C)	Especie	Eo (V, 25° C)
Flúor	3.03	Permanganato	1.68
Flúor diatómico	3.06	Permanganato de potasio	1.70
Radical hidroxilo	2.80	Dióxido de cloro	1.57
Oxígeno atómico	2.42	Cloro	1.36
Ozono	2.07	Dicloro	1.27
Peróxido de hidrógeno	1.78	Ácido hipocloroso	1.49
Radical perhidroxilo	1.70	Ácido peroxosulfúrico	1.81

Tabla 2. Agentes oxidantes utilizados en los POA

Fuente: (Adaptada de Forero y col., 2005; Jones y James, 1999).

En la Tabla 3 se pueden observar algunos casos de estudios recientes de las principales tecnologías de oxidación avanzada y su aplicación para la remoción de contaminantes del agua.

Tabla 3. Casos de estudio de los principales procesos de oxidación avanzada.

Fuente: Elaboración propia

Autores	POA	Contaminante removido	Condiciones	
			pH	Temp.
Lin y col., 2018	O ₃	Cianuro	9	Ambiente
Farzaneh y col., 2020	O ₃ O ₃ /H ₂ O ₂	Productos farmacéuticos	6 a 9	20 - 40 °C
Morillo-Esparza y col., 2019	O ₃ O ₃ /H ₂ O ₂ O ₃ /CA O ₃ /H ₂ O ₂ /CA	Cianuro	10 y 11	Ambiente
Rahmani y col., 2015	Fenton	Cr (VI)	3	Ambiente
Hadiyanto y col., 2020	UV O ₃ UV/O ₃	Aguas residuales de caucho	5.25*	Ambiente
Wu y col., 2019	UV UV/TiO ₂ UV/TiO ₂ /NaCl	Remoción de sulfonamidas	5, 7 y 9	Ambiente
Miklos y col., 2019	UV / H ₂ O ₂	Sustancias químicas orgánicas	N/A	35-40°C
Bustillo-Lecompte y col., 2015	UV / H ₂ O ₂ H ₂ O ₂ /COT	Aguas residuales provenientes de la refinería de petróleo	4-6	20 - 25 °C (± 2)
Sharma y col., 2015	Fe (V) Fe (VI)	Agua y aguas residuales	9	Ambiente

* El pH no fue tomado en cuenta por los investigadores

N/A: No fue tomado en cuenta en el caso de estudio

CA: Carbón activado, COT: Carbono orgánico total

Ozonización

Kim y col. (2003) mencionan que el ozono es el agente oxidante más fuerte para destruir todo tipo de efluentes que contienen cianuro. El mecanismo de operación de ozonización se puede observar en la Ecuación 3, donde ocurre una reacción que es favorecida en el medio alcalino (Domènech y col., 2004).



Lin y col. (2018) realizaron un estudio para la eliminación de cianuro a partir de aguas residuales del proceso de extracción de oro, para este proceso realizaron pruebas que constaron en la oxidación con O_3 y oxidación catalítica con ozono. Además Lin y col. (2018) revisaron los efectos de la dosis de ozono, concentración inicial del cianuro, pH inicial y salinidad. Para la parte experimental los autores utilizaron una solución real, la cual contenía una concentración de CN de 15~20 mg L^{-1} y la concentración de DQO es de 150~200 mg L^{-1} . Para los efectos de la dosis de ozono, los investigadores observaron que el proceso combinado obtuvo un mejor rendimiento en eliminación de cianuro debido que este proceso no obtuvo una dosis extra de O_3 , mientras que el proceso de ozono se realizó un aumento de 16 mg L^{-1} . En cuanto a la salinidad, Lin y col. (2018) mencionan que esta sí influye debido a que existe en el medio una competitividad de aniones inorgánicos con el catalizador, sin embargo mencionan que en este proceso no influye de manera significativa por lo cual es adecuado para el uso de tratamiento de aguas residuales, en cuanto al pH observaron que hubo una mayor eliminación cuando este se encontraba en 9, debido a que cuando se encontraba en 5 la condición ácida no pudo promover la actividad entre el O_3 y el CN, en cuanto a la concentración del cianuro encontraron que cuando se obtenía una mayor concentración se proporcionaba con más fuerza impulsora para transferir el cianuro a la superficie de la diatomita. Por lo tanto, los radicales hidroxilo generados por el ozono podrían reaccionar con más cianuro.

Las principales ventajas del uso de ozono son: una descomposición muy rápida y completa de cianuros, cianatos y tiocianatos; ausencia de transporte, almacenamiento y manipulación de productos químicos; sin producción de químicos tóxicos residuales; bajo mantenimiento, mano de obra y operación simple. Sin embargo, como la mayoría de los procesos de oxidación, la ozonización no tiene resultados eficientes, por lo cual, se han realizado investigaciones para optimizar, y reducir costos de dicho proceso (Kim y col., 2003).

Ozono / H₂O₂

Como se mencionó anteriormente, la ozonización es un proceso capaz de eliminar todo tipo de efluentes, sin embargo, cuando se agrega peróxido de hidrógeno a dicho sistema este acelera de manera eficiente la descomposición de ozono a la formación de radicales hidroxilos (OH), debido a que se produce una destrucción adicional en la carga orgánica (Forero y col., 2005). El mecanismo para dicho proceso se puede observar en la Ecuación 4 (Kurt y col., 2017).



Esta oxidación por peróxido de hidrógeno consiste en oxidar cianuros a cianatos (CNO⁻), que se considera menos tóxico, o en CO₃²⁻, cuando se utiliza un exceso de H₂O₂ (Yeddou y col., 2011).

Además, Yeddou y col. (2011), mencionan que este proceso siempre requiere el uso de un catalizador para aumentar la tasa de eliminación de cianuros, el cual generalmente es el cobre soluble.

Cabe mencionar que una condición crítica de este proceso es el pH ya que de este dependerá la velocidad de reacción en los radicales hidroxilo (Kurt y col., 2017).

Kepa y col. (2007) realizaron un estudio que consistió en realizar un análisis comparativo, con el cual pudieron determinar la eficiencia del O_3 y H_2O_2 . Este consistió en realizar una prueba preliminar, en donde se determinaron las dosis efectivas de ozono, para diferentes concentraciones iniciales de cianuro en el proceso de ozonización y el efecto del valor de reacción en la eficiencia del proceso, durante la prueba la concentración inicial de cianuro que se utilizó fue de 0.05 mg L^{-1} , el agua analizada se llevó al valor de pH deseado dosificando una solución 0.1 N de NaOH o una solución 0.1 N de HCl. Además se realizó una prueba principal en la que se determinó la eliminación de cianuros usando dos sistemas de oxidación avanzada, es decir, O_3/H_2O_2 , H_2O_2/O_3 , para el uso de H_2O_2 las concentraciones fueron de 2, 4, 6, 8, 12 y 15 mg L^{-1} a pH 7.0, con concentraciones iniciales de cianuro de 0.3 y 0.5 mg L^{-1} , y ampliaron la dosis del H_2O_2 hasta que se eliminaron los cianuros al nivel requerido. En las pruebas que realizaron, este rango se amplió aumentando la dosis de peróxido de hidrógeno hasta eliminar los cianuros al nivel requerido. Todas las pruebas anteriores se llevaron a cabo a una temperatura constante del agua de 20° C . Los resultados que obtuvieron que el proceso más eficiente para la eliminación de cianuro es con el sistema H_2O_2/O_3 , ya que este permitió eliminar la contaminación a un nivel permitido.

Ozono / UV

De acuerdo con Collivignarelli y col. (2018) cuando se combina el ozono con radiación UV se crea una reacción fotoquímica entre la fase gaseosa y la solución acuosa, lo que ocasiona una formación de radicales, lo anterior lo podemos observar en la Ecuación 5 en donde el $h\nu$ nos indica la radiación de UV:



Además, el investigador menciona que la producción de radicales resulta de reacciones secundarias a partir de la absorción de peróxido de hidrógeno, Ecuación 6:



De la fotosíntesis de peróxido de hidrógeno, Ecuación 7:



Chin y Bérubé (2005), llevaron a cabo un estudio para analizar la eficiencia del uso de O_3 y UV para la eliminación de dos tipos de precursores en subproductos de desinfección. Para las pruebas se tomaron 3 lotes de 300 L de agua cruda, utilizando como reactor un tanque al que le adecuaron un generador de ozono que burbujeo a través de la base contactadora a un caudal de 0.29 L min^{-1} y un reactor UV, además utilizaron un recolector de ozono residual con dos trampas en serie de KI. Las pruebas se mantuvieron a 20°C y fueron a un tiempo de 0, 5, 10, 30 y 60 min para los 3 tratamientos (O_3 , UV y O_3/UV).

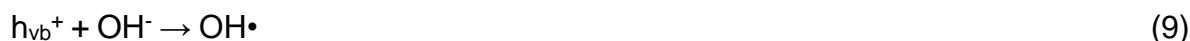
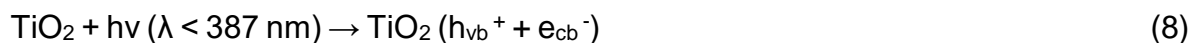
Los resultados indicaron que los tratamientos por sí solos no tuvieron impacto en los componentes orgánicos que se encontraban en las aguas crudas, por otro lado, en el proceso de oxidación combinada se observó una importante disminución en la concentración de TOC en los crudos, así mismo los autores concluyeron que a pesar de que se obtuvieron los resultados esperados, no pueden asegurar que el proceso sea 100% eficaz para la eliminación de los precursores.

UV/ TiO_2

El UV/ TiO_2 es uno de los procesos más eficientes de la oxidación avanzada, debido a la actividad foto catalítica del TiO_2 el cual produce $\text{OH}\cdot$; además, un aspecto importante es que en este proceso se utiliza el oxígeno de la atmosfera como oxidante (Al-Mamun y col., 2019).

El mecanismo se produce bajo la luz ultravioleta con una energía superior a 3.2 eV , dando paso a los electrones (e_{cb}^-) y huecos (h_{vb}^+), lo anterior se puede observar en la siguiente Ecuación 8 además una porción de pares $h_{ubo}^+ - e_{cb}^-$ escapan del

proceso de combinación y migran a la superficie de TiO_2 , donde se convierten en $\text{OH}\cdot$ y $\text{HO}_2^\circ / \text{O}_2^\circ$ reaccionando con OH^- y O_2 , respectivamente Ecuaciones 9 y 10, Alternativamente, los huecos y los electrones pueden reaccionar directamente con sustratos cercanos la superficie de TiO_2 Ecuaciones 11 y 12 (Yoon y Lee, 2005):



Algunos investigadores como Yildiz y col. (2005) realizaron un estudio para la recuperación de cianuro a partir de aguas residuales que provenían de una planta de procesamiento ubicada en Kutahya, Turquía. Dichas soluciones contenían zinc y cobre en altas concentraciones, para la primera etapa los investigadores realizaron pruebas preliminares para la recuperación del cianuro usando un pH de 6.5 ± 0.5 , a 20 min con temperatura ambiente. Después que se capturó dicha muestra y la pulpa fue neutralizada con cal para que el pH aumentara a 11 y así minimizar la pérdida de cianuro como gas HCN, estas pruebas se llevaron a cabo en contenedores de polietileno de alta densidad sin espacio libre, la reacción de ozonización se llevó a cabo en el reactor de vidrio pasando gas ozono a $13 \text{ mg O}_3 \text{ min L}^{-1}$ en todos los experimentos la temperatura ambiente constante (presión de oxígeno, 1 bar; pH, ~ 13); el sistema ozono/UV (Pen-Ray, 254 nm). Los resultados que se obtuvieron cuando los catalizadores se compararon entre sí, muestran que el proceso $\text{O}_3/\text{UV}/\text{TiO}_2$ fue el más eficiente y es más conveniente para la reducción del cianuro residual en menor tiempo.

UV/ H₂O₂

Este proceso se lleva a cabo en su mayoría para la desinfección y eliminación de materia orgánica en aguas contaminadas, este proceso produce radicales hidroxilos a partir de la fotólisis UV del H₂O₂ (Audenaert y col., 2011).

Lo anterior se puede observar en las siguientes Ecuaciones 13 y 14 (Rubio-Clemente y col., 2017).



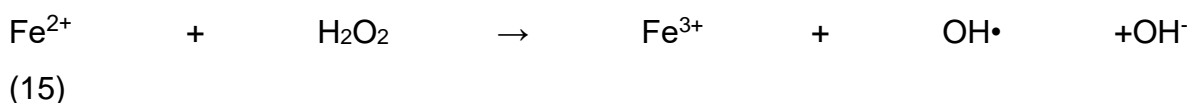
Dotson y col. (2010) realizaron una investigación en donde analizaron los cambios de formación de subproductos a partir de la desinfección aplicando UV y UV/H₂O₂ seguido de la aplicación de cloro libre para moderar al peróxido de hidrógeno y proporcionar desinfectante residual. Para las pruebas los investigadores recolectaron dos muestras de agua de la planta, el sistema LPUV se equipó con cuatro lámparas UV de baja presión de 15 W (W), que emiten una salida monocromática de 253.7 nm a través de un cuatro pulgadas apertura circular, para la fase de formación y análisis de subproductos de desinfección se llevaron a cabo a una temperatura de 22 ± 2 °C, y fueron sometidas a una cloración durante 24 h, para la moderación del H₂O₂ se añadió cloro libre 1 mg-Cl₂/L. Estos estudios dieron como resultado que el UV por si solo puede lograr la eliminación de productos farmacéuticos, sin embargo, cuando se utilizan los dos procesos combinados UV/H₂O₂, su eficiencia aumenta, además también observaron que los cambios en los rendimientos de cada uno de los procesos se deben a la cloración debido a que este aumenta los valores de exposición de los OH•.

Proceso Fenton

El proceso Fenton es un método catalítico ampliamente estudiado debido a que es muy eficaz, ya que genera radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$) a partir de peróxido de hidrógeno que actúan como catalizador homogéneo a pH ácido y condiciones ambientales (Xu y col., 2020). El radical $\text{OH}\cdot$ tiene un alto potencial de oxidación estándar (2.80 V) y exhibe altas velocidades de reacción.

En comparación con otros oxidantes convencionales como Cl_2 , O_2 , O_3 , peróxido de hidrógeno o KMnO_4 . Este radical reacciona con la mayoría de los solutos orgánicos e inorgánicos con altas constantes de velocidad (Bautista y col., 2008).

El mecanismo de reacción se ha realizado conforme a la formación de las especies hidroxilo, en donde los radicales libres atacan el compuesto orgánico, como se describe en las siguientes Ecuaciones 15 a la 21:



Autores como Rahmani y col. (2015), realizaron un estudio para la eliminación de Cr (VI) de soluciones provenientes de la industria, en donde utilizaron el proceso electro-Fenton. Para este proceso optaron por un reactor con agitador al cual le adaptaron dos electrodos como ánodo y otros dos electrodos como cátodos que

conectaron al dispositivo de suministro de energía. Las condiciones de pruebas fueron a temperatura ambiente, además, se prepararon diversas soluciones madre con dicromato de potasio, variando las concentraciones iniciales de Cr (VI) y agua destilada, para la primera fase de sus pruebas probaron el efecto del pH y pudieron establecer un pH óptimo ajustándolo con hidróxido de sodio (1 N) y ácido sulfúrico (1 M). Después de la primera fase se probaron con diferentes voltajes que fueron de (10, 20 y 30 V). Además, se tomaron muestras de mediados del reactor a intervalos de tiempo de 5, 10, 15, 20 y 25 min. Los resultados indicaron que la máxima remoción fue a pH 3, algunos estudios previos revelaron que los valores de pH en la oxidación de Fenton deben estar en el rango de 2 a 4 debido a que los autores mencionan que condiciones ácidas fuertes, el sodio la sal de sulfato produce iones de sulfato; iones sulfato y Fe^{2+} en EFP pueden causar la reducción de Cr (VI) a Cr (III), además sus estudios cinéticos indicaron que el proceso de electro Fenton es una opción adecuada para eliminar Cr (VI) de una solución acuosa de manera eficiente.

Oxidación avanzada catalítica

Aunque los procesos de oxidación avanzada son la mejor opción para la eliminación de contaminantes en el agua, tienen la desventaja de ser muy costosos debido a las cantidades elevadas de consumo en productos químicos, además, de altos costos de peróxido de hidrógeno y postratamientos. Debido a lo anterior se han realizado estudios en donde se demuestra que cuando se agrega un catalizador como: dióxido de titanio, nanomateriales, óxidos metálicos, zeolita, hematita, goetita, magnetita y carbón activado, los POA incrementan su rendimiento (Buthiyappan y col., 2016).

Los procesos de oxidación catalítica se dividen en dos tipos, homogéneo, en donde los reactivos se distribuyen uniformemente en la reacción, la cual ocurre dentro del líquido y la heterogénea que ocurre en interfaces de gas-sólido o líquido-sólido.

Cabe mencionar que este tipo de catalizadores tienen lugar en la superficie externa o interna dentro de los poros de los catalizadores (Spivey y Dooley, 2005; Buthiyappan y col., 2016).

Chegini y col. (2020) realizaron una comparación entre la ozonización catalítica y la degradación fotocatalítica del cianuro, para dicho estudio se utilizó como catalizador el ACF-TiO₂ para la eliminación de cianuro y sus complejos, ya que para las soluciones se utilizaron aguas residuales industriales sintéticas y reales. Para la ozonización catalítica usaron un impactador de 250 mL con un difusor de vidrio sinterizado en la parte inferior y para la prueba de la degradación fotocatalítica se usó una fuente de radiación de luz ultravioleta de baja presión (16 W). El efecto de varios parámetros como la dosis de catalizador, el tiempo de reacción, la concentración de cianuro, la concentración de ozono y los aniones se investigaron en ambos procesos para el cianuro. Los resultados indicaron que en el proceso de ozonización simple pudo degradar completamente 100 mg L⁻¹ de cianuro dentro de los 70 min del tiempo de reacción en cuanto a la actividad catalítica del ACF-TiO₂ mostraron una eficiencia de eliminación de cianuro del 93% a pH 11, por lo que el estudio reveló que la combinación de radiación UV con el catalizador ACF-TiO₂ mejora la eficiencia de degradación hasta aproximadamente el 100%. Por lo tanto el ACF-TiO₂ sintetizado es un catalizador prometedor para degradación del cianuro.

Por otro lado, Jiang y col. (2016) estudiaron los efectos de oxidación con ferratos (VI), y el ozono pre-oxidación en la formación de subproductos de desinfección (DBP) posterior a la cloración mediante experimentos por lotes, y los efectos de Fe (VI) y Mn (VII) utilizando experimentos de flujo continuo. Los experimentos fueron llevados en tres etapas: cloración, cloración con ferratos y ozono con cloración. Los experimentos fueron llevados a cabo a 20 °C, pH 7 y dichas pruebas fueron llevadas a 72 horas. Además a dichas soluciones se les

agregó bromo como catalizador (0.15 mg L^{-1} y luego 0.8). Como resultados obtuvieron que el rendimiento de ferrato frente al sistema de ozonización para la eliminación de precursores de DBP se vio afectado por la calidad del agua utilizada, la dosis de oxidante, especies de DBP así como la concentración de bromuro. Sin embargo, los autores mencionan que comparado con los demás sistemas de oxidación el ferrato resulto ser la mejor alternativa para la eliminación de los efluentes.

Conclusiones

A pesar de que los procesos de oxidación avanzada son muy eficientes en la eliminación de contaminantes, es muy difícil emplearlos a nivel industrial debido a los costos de operación que estos resultan, sin embargo, los procesos de oxidación avanzada catalítica resultan ser un gran aporte, debido a que aumentan la producción de radicales hidroxilos, haciendo que los procesos para la eliminación de contaminantes recalcitrantes en las aguas sean más eficaces. Además, algunos de los catalizadores que se tienen contemplados en la literatura se pueden obtener de residuos de otros procesos industriales.

Sería muy interesante realizar una investigación enfocándose en los residuos que más se obtienen en nuestra región, para realizar pruebas a nivel laboratorio y estudiar como se comportan los mecanismos de oxidación de especies tóxicas o en la remoción de iones recalcitrantes presentes en medios acuosos.

Agradecimientos

Garza Román agradece al CONACYT por la Beca No. 777941 otorgada para realizar sus estudios de posgrado, dentro del Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Autónoma de Coahuila.

Referencias bibliográficas

- Alabdraba, W., Al-Obaidi, A., Hashim, S., & Zangana, S. (2018). Industrial Wastewater treatment by advanced oxidation processes - A Review. *Journal of Advanced Sciences and Engineering Technologies*. 1(2): 24-33.
- Al-Mamun, M., Kader, S., Islam, M., & Khan, M. (2019). Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*: 1-17.
- Audenaert, W., Vermeersch, V., Van Hulle, S., Dejans, P., Dumoulin, A., & Nopens, I. (2011). Application of a mechanistic UV/hydrogen peroxide model at full-scale: Sensitivity analysis, calibration and performance evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 171: 113-126.
- Bautista, P., Mohedano, A., Casas, J., Zazo, J., & Rodriguez, J. (2008). Review An overview of the application of Fenton oxidation to industrial wastewaters treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 83: 1323–1338.
- Bustillo-Lecompte, C., Knight, M., & Mehrvar, M. (2015). Assessing the performance of UV/H₂O₂ as a pretreatment process in TOC removal of an actual petroleum refinery wastewater and its inhibitory effects on activated sludge. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 93: 798-807.
- Buthiyappan, A., Raman, A., Aziz, A., & Wan Daud, W. (2016). Recent advances and prospects of catalytic advanced oxidation process in treating textile effluents. *Rev. Chem. Eng.* 32: 1-47.
- Cheguini, Z., Hassani, A., Torabain, A., Boreghi, & S. (2020). Comparing the efficacy of catalytic ozonation and photocatalytical degradation of cyanide in industrial in industrial wastewater using ACF-TiO₂: Catalyst characterization, degradation kinetics and degradation mechanism. *International of Enviornmental Analytic Chemistry*: 1-20.
- Chin, A., & Bérubé, P. (2005). Removal of disinfection by-product precursors with ozone-UV. *Water research*. 39: 2136–2144.

- Collivignarelli, M., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2018). Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants . *Sustainability*. 86: 1-21.
- Cuerda-Correa, E., Alexandre-Franco, M., & Fernández-González, C. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water: An Overview. *Water*. 12: 2-51.
- Deng, Y., & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Curr Pollution Rep.*: 167–176 .
- Domènech, X., Jardim, W., & Litter, M. (2004). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. *Colección de documentos*: 1-26.
- Dotson, A., Keen, O., Metz, D., & Linden, K. (2010). UV/H₂O₂ treatment of drinking water increases post-chlorination DBP formation. *Water Research*. 44: 3703-3713.
- Farzaneh, H., Loganathan, K., Saththasivam, J., & McKay, G. (2020). Ozone and ozone/hydrogen peroxide treatment to remove gemfibrozil and ibuprofen from treated sewage effluent: Factors influencing bromate formation. *Emerging Contaminants*. 6: 225-234.
- Forero, J., Ortiz, O., & Rios, F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *Ciencia, Tecnología y Futuro*. 3 (1): 97-109.
- Ghime, D., & Ghosh, P. (2020). Advanced Oxidation Processes: A powerful treatment option for the removal of recalcitrant organic compound. *Applications, Trends, and Prospects*: 1-12.
- Hadiyanto, H., Christwardana, M., Pratiwi, D., Silviana, S., Syarifudin, M., & Khoironi, A. (2020). Rubber wastewater treatment using UV, ozone, and UV/ozone and its effluent potency for microalgae *Spirulina platensis* cultivation medium. *Cogent Engineering*. 7: 1-11.

- Jiang, J., Goodwill, J., Tobiason, J., & Reckhow, D. (2016). Comparison of the Effects of Ferrate, Ozone, and Permanganate Pre-Oxidation on Disinfection By product Formation from Chlorination. *Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*: 421-437.
- Jones, C., & James, H. (1999). Chapter 2: Activation of Hydrogen Peroxide Using Inorganic and Organic Species. *Applications of Hydrogen Peroxide and Derivates* (pp. 37-78). Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Kepa, U., Stanczky-Mazanek, E., & Stepniak, L. (2007). The use of the advanced oxidation process in the ozone + hydrogen peroxide system for the removal of cyanide from water. *Desalination*. 223: 187-193.
- Kim, Y., Qureshi, T., & Min, K. (2003). Application of advanced oxidation processes for the treatment of cyanide containing effluent. *Environmental Technology*. 24: 1269-1276.
- Kurt, A., Mert, B., Özengin, N., Sivrioğlu, O., & Yonar, T. (2017). Treatment of Antibiotics in Wastewater Using Advanced Oxidation Processes (AOPs). *Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery*: 175-211.
- Lin, M., Gu, Q., Cui, X., & Liu, X. (2018). Cyanide Containing Wastewater Treatment by Ozone Enhanced Catalytic Oxidation over Diatomite Catalyst. *MATEC Web of Conferences*. 142: 1-7.
- Miklos, D., Hartl, R., Michel, P., Linden, K., Drewes, J., & Hübner, U. (2019). UV/H₂O₂ process stability and pilot-scale validation for trace organic chemical removal from wastewater treatment plant effluents. *Water Research*. 136: 169-179.
- Morillo-Esparza, J., Cevallos-Cueva, N., Sandoval-Pauker, C., Vargas-Jentzch, P., & Muñoz-Bisesti, F. (2019). Combined treatment using ozone for cyanide removal from wastewater: A Comparison. *Rev. Int. Contam. Ambie*. 35 (2): 459-46.
- Rahmani, A., Hossieni, E., & Poormohammadi, A. (2015). Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution. *Environ. Process*. 2: 419-428.

- Rubio-Clemente, A., Chica, E., & Peñuela, G. (2017). Kinetic Modeling of the UV/H₂O₂ Process: Determining the Effective Hydroxyl Radical Concentration. *Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery*: 19-41.
- Sharma, V., Zboril, R., & Varma, R. S. (2015). Ferrates: Greener Oxidants with Multimodal Action in Water treatment technologies. *Acc. Chem. Res.* 48 (2): 182–191.
- Spivey, J., & Dooley, K. (2005). *Catalysis* (Volumen 18). Cambridge, UK. 196 Pp.
- Wu, C., Kuo, C., Dong, C., Chen, C., & Lin, Y. (2019). Removal of sulfonamides from wastewater in the UV/TiO₂ system: effects of pH and salinity on photodegradation and mineralization. *Water Science and Technology*. 79: 349–355.
- Xu, M., Wu, C., & Zhou, Y. (2020). Advancements in the Fenton Process for Wastewater Treatment. *Advanced Oxidation Processes - Applications, Trends, and Prospects, Intechopen*: 1-17.
- Yeddou, A., Chergui, S., Chergui, A., Halet, F., Hazma, A., Nadjemi, B., Belkouch, J. (2011). Removal of cyanide in aqueous solution by oxidation with hydrogen peroxide. *Minerals Engineering*. 24: 788-793.
- Yildiz, E., Vapur, H., Gül, S., Özcan, O., & Bayat, O. (2005). Gradual cyanide treatment using AVR and ozone/UV systems with various catalysts in silver mill effluents. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 114: 115-120.
- Yoon, S.-H., & Lee, J. (2005). Oxidation Mechanism of As(III) in the UV/TiO₂ System: Evidence for a Direct Hole Oxidation Mechanism. *Environmental Science and Engineering*. 39: 9695-9701.