

Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión

(Advanced Oxidation as an Alternative Treatment for Wastewater. A Review)

Miguel Ángel López Ramírez¹, Olaya Pirene Castellanos Onorio², Fabiola Lango Reynoso³, María del Refugio Castañeda Chávez⁴, Jesús Montoya Mendoza⁵, Cinthya Alejandra Sosa Villalobos⁶, Benigno Ortiz Muñiz⁷.

Resumen

Cada año se vierten millones de metros cúbicos de aguas residuales a los cuerpos de agua, las cuales son tratadas de forma inadecuada, siendo estos procedimientos ineficientes para alcanzar lo requerido por la ley o para uso dentro de los procesos industriales. En estos casos, y debido a la escasez del hídrico, se está recurriendo al uso de los procesos de oxidación avanzada como tratamiento alternativo. Estos procesos se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, involucrando la generación y uso de especies transitorias de gran poder oxidante, principalmente el radical hidroxilo, el cual puede ser generado por medios fotoquímicos o por otras formas de energía y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica. Esta revisión tiene como objetivo realizar un análisis de la influencia de los tratamientos en el proceso de descontaminación.

Palabras clave

Aguas residuales, tratamiento alternativo, procesos de oxidación avanzada.

Abstract

Every year millions of cubic meters of wastewater are discharged into water bodies, which are treated in an inadequate way, these procedures being inefficient to achieve what is required by law or for use within industrial processes. In these cases, and due to the scarcity of water, the use of advanced oxidation processes is being used as an alternative treatment, which are based on physicochemical processes capable of producing profound changes in the chemical structure of pollutants, involving the generation and the use of transitory species with great oxidizing power, mainly the hydroxyl radical, which can be generated by photochemical means or by other forms of energy, and is highly effective in the oxidation of organic matter. This review aims to perform an analysis of the influence of treatments on the decontamination process.

Keywords

Wastewater, alternative treatment, advanced oxidation processes.

- 1 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre. México. [malopez@tecmartinez.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5841-0668>]
- 2 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Veracruz. México. [olaya.co@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3510-2640>]
- 3 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. México. [fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0001-8359-434X>]
- 4 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. México. [mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9209-0431>]
- 5 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. México. [jesusmontoya@bdelrio.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7598-7300>]
- 6 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. México. [cinthyasosa@bdelrio.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-2855-9311>]
- 7 Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Veracruz. México. [benigno.om@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5211-9175>]

1. Introducción

De la cantidad total de agua existente en la Tierra tan solo el 1,0 % es potable. Un mal tratamiento de esta ha causado problemas sanitarios y enfermedades asociadas a comunidades enteras, ya que 80 % de las enfermedades que azotan a los países en vía de desarrollo son ocasionadas por un abastecimiento de agua deficiente (Sarria et al., 2005). El acceso al agua potable es un derecho imprescindible, ya que satisface las necesidades básicas referidas a la salud y las condiciones de vida de las poblaciones humanas, expresado por el derecho de gozar de altas coberturas en los servicios de agua y saneamiento. Sin embargo, a nivel mundial aún se identifican deficiencias en la calidad de la prestación de los servicios, organización, ausencia de planificación e insuficiente inversión que puedan garantizar, a medio y largo plazo, el sostenimiento de las coberturas en los servicios de agua y saneamiento en numerosos países.

A pesar de la limitación para obtenerla en una calidad aceptable, el agua es el elemento central de todos los procesos vitales, sociales y económicos que forman parte de un ciclo cerrado. Este ciclo se encuentra en crisis, debido a que el incremento y desarrollo de la sociedad de consumo exige un aumento constante de las actividades industriales y agroindustriales (Sarria et al., 2005)

Este creciente problema exige un riguroso control de la contaminación y una legislación cada vez más exigente. Como respuesta a ello, y dada la incapacidad de los métodos convencionales para remover efectivamente muchos de los contaminantes existentes, en los últimos años se ha presentado una intensa búsqueda de nuevas y eficientes tecnologías de tratamiento de aguas (Ollis y Al-Ekabi, 1983). Y, debido a la progresiva demanda de la sociedad para la descontaminación de aguas contaminadas de diversos orígenes, se han materializado regulaciones cada vez más estrictas.

En la práctica, la aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta, fundamentalmente, la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar (Water Treatment Handbook, 1991). En general, las aguas contaminadas por la actividad humana pueden ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio, entre otros.). Sin embargo, en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos, y debido a la escasez del hídrico, en los países industrializados se está recurriendo al uso de las llamadas tecnologías o procesos de oxidación avanzada (TOA, POA), los cuales son muy poco aplicados y, peor aún, menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina. La mayoría de POA pueden aplicarse a la remediación y detoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña o mediana escala. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelos e incluso permiten la desinfección por inactivación de bacterias y virus.

A continuación se describirán los fundamentos básicos de POA.

2. Procesos de oxidación avanzada

2.1. Fundamentos de la oxidación química

Históricamente, la contaminación antropogénica de las aguas se ha tratado con métodos convencionales como los procesos biológicos, floculación-precipitación, cloración o adsorción en carbón activo, por citar algunas tecnologías de uso común. Sin embargo, en ciertas ocasiones este tipo de tecnologías no son eficientes, bien sea por la alta toxicidad del efluente a tratar, porque con las tecnologías disponibles no es posible alcanzar los requerimientos de vertido requeridos o, simplemente, por la diversa cantidad de contaminantes que esta contiene, siendo cada vez más común la presencia de compuestos persistentes en las aguas de consumo, aguas superficiales o en los efluentes de las depuradoras (Ikehata, 2008). Esta es una prueba irrefutable de la necesidad de procesos más intensivos en la destrucción de sustancias contaminantes.

En las últimas décadas, las tecnologías de oxidación avanzada se han consolidado como una alternativa eficiente en la destrucción de sustancias tóxicas, incluyendo las orgánicas, inorgánicas, metales o patógenos. En general, en el tratamiento de aguas las tecnologías de oxidación avanzada se utilizan cuando los efluentes contaminados tienen una alta estabilidad química o una baja biodegradabilidad (Poyatos et al., 2010). Es cada vez más común el uso de la oxidación avanzada en los tratamientos terciarios y, especialmente, en las plantas depuradoras de ciertas industrias. Estas tecnologías se han utilizado en la remediación de suelos contaminados, aguas subterráneas o superficiales y sustancias gaseosas (USEPA, 1998; Gogate y Pandit, 2004).

Actualmente, los estudios se enfocan en la búsqueda de valores óptimos para los diferentes parámetros que afectan el proceso de oxidación: pH, temperatura, diseño del reactor, naturaleza y concentración del contaminante y agentes oxidantes que puedan mejorar la reacción. Además, se estudia con detalle la cinética de reacción, que generalmente es de primer orden, con respecto a la concentración de radicales hidroxilos ($^{\circ}\text{OH}$) y a la concentración de las especies a ser oxidadas. Generalmente, las velocidades de reacción están en el rango de 10^8 - 10^{11} $\text{L mol}^{-1} \text{s}^{-1}$ y la concentración de radicales $^{\circ}\text{OH}$ está entre 10 - 12 mg L^{-1} , variable que juega un papel muy importante en la real aplicación del proceso (Arslan-Alaton, 2003).

Los radicales $^{\circ}\text{OH}$ se generan *in situ* por la aplicación directa o por la combinación de agentes oxidantes como el ozono, el peróxido de hidrógeno, la radiación ultravioleta o las sales férrico/ferrosas, entre otras. Entre la gran variedad de tecnologías disponibles las más comunes son: la combinación UV y peróxido ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$) (Li et al., 2011), el reactivo Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) (Gogate, 2010) y dos de sus variantes como el foto-Fenton (Saatci et al., 2010) y el hierro cero-valente (Fe^0) (Kallel, 2009), que es una combinación de las anteriores, o la fotocatalisis (UV/TiO_2) (Ovhal, 2010). La continua innovación de estas tecnologías está propiciando nuevos desarrollos con la aplicación de microondas (Zhao, 2011), nuevos catalizadores, ultrasonidos (Khatri, 2011; Mahamuni, 2010), entre otros. Una de las posibles formas de clasificación de este tipo de tecnologías la ofrece Poyatos (2010) que distingue, principalmente, las tecnologías homogéneas y heterogéneas. Tal como se muestra en la figura 1.

Existen otras tecnologías que pueden incluirse entre POA como el tratamiento con barreras permeables reactivas de Fe metálico (Deng et al., 1999) y la oxidación con K_2FeO_4 (Fe^{3+}). Sin embargo, en esta revisión nos referiremos solo a aquellas tecnologías que involucran principalmente al radical $^{\circ}\text{OH}$.

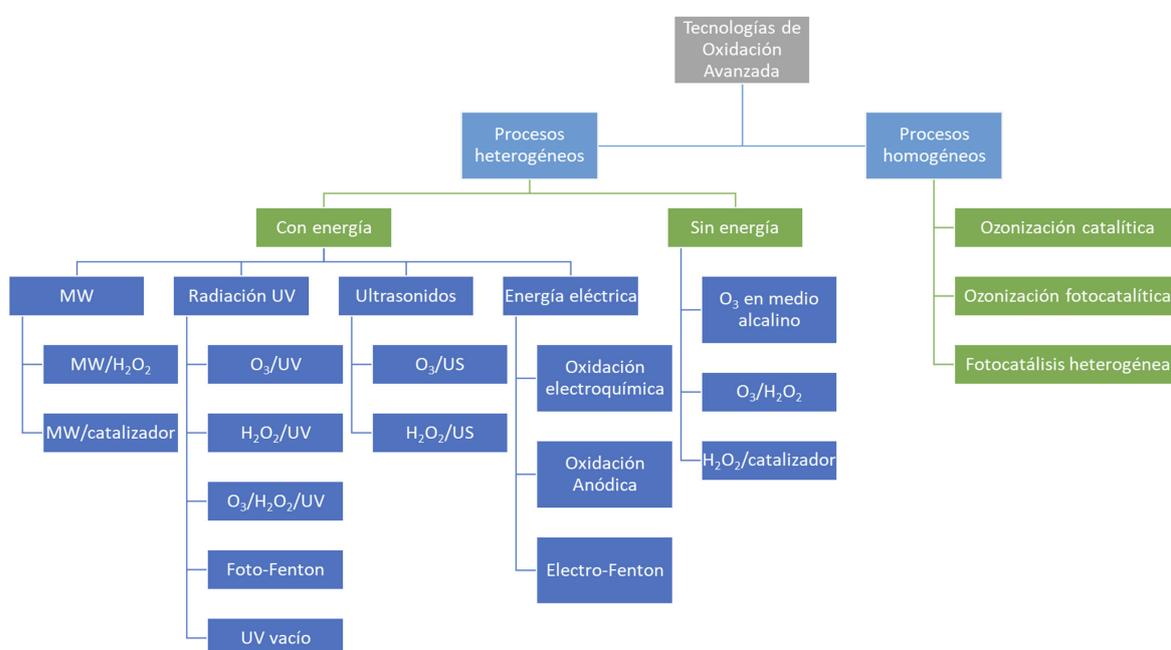
En la tabla 1 se muestran las principales tecnologías de oxidación avanzada, algunas de las cuales son evaluadas a escala nivel laboratorio y planta piloto.

Tabla 1. Principales tecnologías de procesos de oxidación avanzada

Tecnología de oxidación avanzada	Proceso
Ozonificación/Peróxido de hidrógeno	Oxidación en agua sub/supercrítica, Fotólisis ultravioleta-vacío (UV-V)
Procesos Fenton	Ultravioleta/peróxido de hidrógeno
Oxidación electroquímica	Ultravioleta/ozono

Fuente: Forero et al., 2005.

Figura 1. Clasificación de las tecnologías de oxidación avanzada a presiones y temperaturas ambientales



Fuente: Sanz et al., 2013.

2.2. Ozonización/Peróxido de hidrógeno

El ozono es un gas incoloro, de olor fuerte, con alto poder oxidante ($E_0=2.08V$). Es la forma triatómica del oxígeno y en fase acuosa se descompone rápidamente a oxígeno y especies radicales (Teixeira, 2002). El primer trabajo utilizando ozono como desinfectante fue hecho por De Mertens en 1886. Sin embargo, solamente hasta 1973, durante el primer Simposio Internacional en Ozono realizado en Washington, se usó la terminología 'Tecnologías de oxidación avanzadas' (Rodríguez et al., 2008). El ozono ha sido estudiado varios años atrás, principalmente en tratamiento de agua para abastecimiento. Sin embargo, dada su reconocida capacidad de oxidar compuestos de difícil tratabilidad, su utilización en diferentes efluentes industriales está siendo cada vez más citada en la literatura. Por ejemplo, en varios trabajos se reporta su aplicación en

el tratamiento de los efluentes industriales de la industria de papel y celulosa (Mounteer, 2005). Azbar et al. (2004) trabajaron en la degradación de algunos compuestos presentes en efluentes de la industria textil. Además, también se ha utilizado para remoción de algunos pesticidas y compuestos fenólicos presentes en trazas (Lopez-Lopez, 2007).

La aplicación de ozono favorece la remoción del color con eficiencias de remoción entre 95 % y 97 %, tratando efluentes de la industria de pulpa y papel (Pokhrel y Viraraghavan, 2004). Sin embargo, en lo que se refiere a la reducción de demanda química de oxígeno (DQO) o carbono orgánico total (COT) las eficiencias no exceden usualmente 50 % a 40 %, respectivamente (Agustina et al., 2005).

En la tabla de 2 se muestran las eficiencias en diversos tratamientos por ozonificación o adición de peróxido de hidrógeno.

Tabla 2. Eficiencias de reducción en proceso de oxidación por ozono/peróxido de hidrógeno.

Autor	Agua residual	Condiciones	Eficiencia
Gutiérrez et al., 2002	Agua de formación de crudo	Dosis de ozono: 30 mg L ⁻¹ Tiempo de reacción: no específica	Remoción del 49 % en DQO
Cokay-Catalkaya y Kargi, 2007	Industria de pulpa	Dosis de Ozono: 4.7 – 11.9 g h ⁻¹ Tiempo de reacción: 30 minutos pH: 3 – 11	Reducción de COT hasta un 29 %
Kreetachat et al., 2007	Derivados de la lignina	Dosis de ozono: 1.0 a 4.0 L min ⁻¹ Tiempo de reacción: no específica	Remoción de color del 90 %
Caviedes-Rubio, 2015	Agua con colorante azul	Dosis de H ₂ O ₂ : 0 a 816 mg pH: Neutro Tiempo de reacción: hasta 3 horas	Reducción del 91 % de la DQO
Cokay-Catalkaya y KArgi, 2007	Industria del papel	Dosis de H ₂ O ₂ : 170 a 3400 mg L ⁻¹ pH: 11 Presión: 254 mm de Hg	Reducción del 11 % respecto al COT
Adams y Kuzhikanil, 2000	Agua residual con Barquat y Bardac	Dosis de H ₂ O ₂ : 1000 mg L ⁻¹ . pH: 8 Presión: 254 mm de Hg	Reducción de DQO entre 20 y 30 %

2.3. Proceso Fenton

El proceso de oxidación Fenton se conoce por su alta efectividad en la descontaminación de aguas provenientes de la industria petroquímica, textil, farmacéutica, papelera, entre otras. (Babuponnusami y Muthukumar, 2014). Al emplear los procesos Fenton se puede obtener una degradación parcial o total de contaminantes inorgánicos y orgánicos persistentes, dando lugar a una disminución de la toxicidad del efluente (Durán Moreno et al., 2011).

El proceso Fenton fue descrito por primera vez en 1894 por Henry J. Fenton cuando descubrió que el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) podía activarse con iones ferrosos para oxidar ácido tartárico (Pignatello et al., 2006). Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de H₂O₂, en medio ácido, para la formación de radicales °OH. A la combinación de H₂O₂ y sales de hierro se denomina reactivo Fenton (Ghosh et al., 2010).

A continuación, se muestra la disociación de las sales férricas y H_2O_2 en la ecuación 1 y la 2.



Además de formarse radicales ${}^{\circ}OH$ se generan radicales perhidroxilo (HO_2°), los cuales inician una reacción de oxidación en cadena para eliminar la materia oxidable. Sin embargo, los radicales HO_2° presentan menor poder de oxidación que los ${}^{\circ}OH$ (Domenech et al., 2004).

Diferentes autores coinciden en que el rendimiento del proceso de oxidación Fenton depende de la concentración del agente oxidante y catalítico, temperatura, pH y tiempo de reacción (Ghosh et al., 2010). Asimismo, la eficiencia está relacionada con la naturaleza del contaminante a degradar y con la presencia de otros compuestos orgánicos e inorgánicos (Kavitha y Palanivelu, 2004). En la tabla 3 se compila un breve resumen de las condiciones de reacción y porcentajes de degradación.

Tabla 3. Eficiencias de reducción en el proceso de oxidación Fenton

Autor	Agua residual	Condiciones	Eficiencia
Ibarra-Tazquez et al., 2018	Producción café soluble	pH: 3.73 Fe^{2+} : 500 mg L ⁻¹ H_2O_2 : 6000 mg L ⁻¹	80,5 % de remoción medida como DQO
Salas, C. 2010	Industria textil	pH: 3.73 Fe^{2+} : 200 mg L ⁻¹ H_2O_2 : 3612 mg L ⁻¹	97 % de remoción medida como DQO
San Sebastian et al., 2001	Industria farmacéutica	pH: 4 $H_2O_2/Fe^{2+} = 10$ (molar)	56,4 % de remoción medida como DQO
Pérez et al., 2002	Industria del papel	pH: 2.8 $H_2O_2/Fe^{2+} = 41$ (molar)	82 % de remoción medida como DQO
Barbusinski y Filipek, 2001	Industria pesticidas	pH: 3.0 – 3.5 $H_2O_2/Fe^{2+} = 21.2$ (w/w)	58,7-87,1 % de remoción medida como DQO
Lopez et al., 2019	Lixiviados	pH: 2.0 Fe^{2+} : 75 mg L ⁻¹ H_2O_2 : 250 mg L ⁻¹	96 % de remoción de DBO

Como se puede observar en la tabla 3, el reactivo Fenton como POA ofrece una alta eficiencia en la remoción de contaminantes de diversas fuentes. Pero, requiere de un ajuste de pH antes y después del tratamiento, debido a que funciona en medio ácido. Así como de un tratamiento posterior para eliminar el hierro residual en el efluente, debido a que genera lodos tóxicos durante el proceso.

2.4. Oxidación electroquímica

La electrodialisis como POA electroquímico combina las membranas y el campo eléctrico, consiste en remover componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante (Guastalli, et al, 2004). Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0.0001 μm mediante hojas o

laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua (Taylor y Wiesner, 2002).

En cambio, la electrocoagulación es un proceso que aplica los principios de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional, induciendo la corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas (Morante, 2002; Caviedes-Rubio, 2015).

Mercado, González y Valencia, en el año 2013 realizaron un estudio en el que evaluaron la electro-coagulación a nivel laboratorio. Este estudio tomó como parámetros la distancia entre electrodos (1.0 1.5 cm), densidades de corrientes bajas (3.6, 5.0 y 7.0 A) y un tiempo de operación entre 10 y 15 minutos. Esta técnica electroquímica produce flóculos de hidróxido metálicos debido a la electro-disolución de los ánodos de hierro. Se generan cationes metálicos en los ánodos debido a su oxidación electroquímica, además de oxígeno (Heidmann y Calmano, 2008). La separación de los contaminantes se produce por dos vías: flotación y precipitación (Meas et al., 2010)

En la tabla 4 se mencionan las principales aplicaciones de la electroquímica en la remoción de metales pesados, ya que la principal aplicación de este tratamiento es la separación por medio de la afinidad eléctrica de los iones metálicos disueltos en aguas residuales.

Tabla 4. Eficiencias de reducción en el proceso de oxidación electroquímica

Autor	Contaminante metálico	Condiciones	Eficiencia
Mahuud y Hoadley., 2012	Cu ²⁺	Temperatura: 25 °C pH: 7 Tiempo: 2 h Electrodiálisis de intercambio iónico híbrido	Eficiencia máxima del 43 %
Sadyrbaeva, 2014	Co ²⁺	Temperatura: 25 °C pH: 6 Tiempo: 3 h Electrodiálisis de intercambio combinada con una membrana líquida de 20-30 μm	>75 %
Cifuentes et al., 2011	Mo	Separación de especies por electrodiálisis	Entre 45,2-66,6 %
Jack et al., 2013	Cu ²⁺	Temperatura: ambiente pH: 4-8 Tiempo: 30 minutos electroquímica	95 %
Khosa et al., 2013	Ni ²⁺ , Pb ²⁺ y Cd ²⁺	Temperatura: ambiente pH: 1-7 Tiempo: 10 minutos electroquímica usando electrodos de hierro adicionada con Potasio Clorhídrico	99 %, 98,3 % y 96,8 %
Al-Shannag et al., 2015	Cu ²⁺ , Cr ³⁺ Ni ²⁺ y Zn ²⁺	Temperatura: 26 °C pH: 9,5 Tiempo: 45 minutos electro-reactor con electrodos de acero de carbono de configuración monopolar	>97 %

El proceso de electrodiálisis es uno de los más caros debido a las membranas finas que se ocupan en este. Además de ser un proceso que necesita constante supervisión, debido a que las membranas, cuando se encuentran saturadas, pueden inhibir la reacción. Mientras que los procesos de electrocoagulación son recientes, y debido al poco estudio que se le ha dado, se encuentran en desarrollo nuevos materiales de cátodos y ánodos o posibles agentes catalizadores que ayuden a la formación de iones, los cuales den mejor resultado en el proceso de descontaminación.

2.5. Ventajas y desventajas

Los procesos de oxidación avanzada presentan ventajas y desventajas. A continuación, se mencionan las más importantes:

Los procesos de oxidación avanzada son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico. Además, sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración en partes por billón (ppb).

Los POA eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro y no forman subproductos de reacción o se forman en baja concentración.

Una importante desventaja de los POA es que sus costos operacionales son relativamente altos, comparados con los de los tratamientos biológicos convencionales. Sin embargo, su utilización como etapa de pretratamiento para el aumento de la biodegradabilidad de las aguas residuales que contienen compuestos recalcitrantes puede ser potencialmente justificada si los productos intermediarios resultantes son fácilmente degradados por microorganismos, aportando una mejor calidad de agua y disminuyendo la contaminación de este hídrico sin importar la fuente puntal de donde provenga.

3. Conclusiones y recomendaciones

Como se puede observar en el texto, existe una gran diversidad de tratamientos de oxidación avanzada, los cuales tienen presentes los radicales $^{\circ}\text{OH}$. Estos radicales son altamente efectivos para la oxidación de materia orgánica, en especial aquella que no es biodegradable. A pesar de que los tratamientos más típicos que los producen son ozono/peróxido de Hidrógeno, el proceso de oxidación Fenton se encarga de formar los mismos radicales con la presencia de hierro como catalizador y peróxido. Además ayuda en el proceso de precipitación, ya que a comparación de los otros 2 tratamientos al poseer durante su proceso una sal de hierro, coagula la materia en diversos procesos de industrias como la alimenticia, papelera, farmacéutica, entre otros.

Caso contrario con los procesos electroquímicos si bien es cierto, estos procesos también generan el radical $^{\circ}\text{OH}$ derivado de una carga eléctrica en el medio y funcionan en la reducción de compuestos orgánicos, también se pueden ocupar para aguas residuales contaminadas con metales pesados. Esto, debido a los cátodos y ánodos que se utilizan en el proceso, tal como muestran Piña-Soberanis et al (2011) en su trabajo "Revisión de variables de diseño y condiciones de operación".

Los procesos o tecnologías de oxidación avanzada, a pesar de ser técnicas aplicables en países desarrollados, en América Latina existen industrias y empresas importantes a nivel internacional que podrían incluir estos tipos de procesos. Algunos ejemplos son: industrias mineras, de extracción de hidrocarburos, alimenticias, metalúrgica o de transformación de materias, en las cuales existen compuestos químicos difíciles de degradar y pueden causar daño al ambien-

te. Sin embargo, para procesos típicos como el tratamientos de aguas grises o domésticas no son tan aplicables, ya que los contaminantes son de fácil degradación. Si bien los tiempos de tratamiento serían menores los costos se elevarían, ya que muchos de estos procesos son por separación mecánica o biológica.

Referencias

- Adams C. D., y Kuzhikanni, J. J. (2000). Effects of H₂ O₂ / UV Preoxidation on the Aerobic Biodegradability of Quaternary Amine Surfactants. *Water Research*, 34: 668-672. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00186-4)
- Agustina, T. E.; Ang, H. M., y K.Vareek, V. (2005). A Review of Synergistic Effect of Photocatalysis and Ozonation on Wastewater Treatment, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 6: 264-273. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2005.12.003>
- Al-Shannag, M., et al. (2015). Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. *Chemical Engineering Journal*, 260: 749-756. <https://n9.cl/xuaam>
- Arslan-Alaton I. (2003). A review of the effects of dye-assisting chemicals on advanced oxidation of reactive dyes in wastewater. *Coloration Technology*, 119: 345-353. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2003.tb00196.x>
- Azbar, N.; Yonar, T., y Kestioglu, K. (2004). Comparison of Various Advanced Oxidation Processes and Chemical Treatment Methods for COD and Color Removal form a Polyester and Acetate Fiber Dyeing Effluent, *Chemosphere*. 55: 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.046>
- Babuponnusami, A. y Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1): 557-572. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>
- Barbusinski, K. y Filipek, K. (2001). Use of Fenton's reagent for removal of pesticides from industrial wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10: 207-212. <https://n9.cl/imi91>
- Caviedes-Rubio, D. I., et al. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1): 73-90. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- Chamizo, H. (2003). Introducción a la interface salud ambiente. Curso especial de posgrado atención integral de salud. Costa Rica. CENDEISS. Recuperado de <https://n9.cl/whw7b>
- Cifuentes, L., et al. (2011). Separación de especies de molibdeno por electrodiálisis. *Chemical Engineering Communications*, 198: 805-814. <https://doi.org/10.1080/00986445.2011.534015>
- Deng, B.; Burris, D. R., y Campbell, T. J. (1999). Environmental Applications of Nanomaterials: Synthesis, Sorbents and Sensors. Imperial Collegue Press de <https://n9.cl/szvkp>
- Domenech, X., et al. (2004). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En M.A. Blesa y B. Sánchez (eds). *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*. Colección Documentos Ciemat. <https://n9.cl/rd1t6>
- Durán-Moreno, A., et al. (2011). Assessment of Fenton's reagent and ozonation as pretreatments for increasing the biodegradability of aqueous diethanolamine solutions from an oil refinery gas sweetening process. *Journal of Hazardous Materials*, 186: 1652-1659. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.043>
- Forero, J. E.; Ortiz, O. P., y Ríos, 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. www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v3n1/v3n1a08.pdf
- Ghosh, P.; Samanta, A.N., y Ray, S. (2010). COD reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton's oxidation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88(6): 1021-1026. <https://doi.org/10.1002/cjce.20353>

- Gogate P.R., y Pandit A.B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8: 501-551 de http://repository.ias.ac.in/39608/1/49_pub.pdf
- Guastalli, A., et al. (2004). *Application of Electrodialysis on Recovering Phosphoric Acid From an Industrial Rinsewater, Trends in Electrochemistry and Corrosion the Beginning of the 21st Century*. Edicions Universitat Barcelona. <https://n9.cl/z8t91>
- Gutiérrez, E., et al. (2002). Efecto de la aplicación de ozono sobre la biodegradabilidad de aguas de formación. *Multiciencias*, (2)1: 50-54. <https://www.redalyc.org/pdf/904/90420106.pdf>
- Heidmann, I., y Calmano, W. (2008). Removal of Cr (VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes. *Separation and Purification Technology*, (61)1: 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.09.011>
- Ibarra-Tazquez, H.N.; Dobrosz-Gómez, I., y Gómez, M. A. (2018). Optimización multiobjetivo del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la producción de café soluble. *In-formación Tecnológica*, 29(5): 111-122. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000500111>
- Ikehata K.; El-Din M.G., y Snyder S.A. (2008). Ozonation and advanced oxidation treatment of emerging organic pollutants in water and wastewater. *Ozone: Science & Engineering*, 30: 21-26. <https://doi.org/10.1080/01919510701728970>
- Jack, F., et al. (2013). Electrocoagulation for the removal of copper from distillery waste streams. *Institute of Brewing & Distilling*. Wiley Online Library, 342: 60-64. <https://n9.cl/Owily>
- Kallel, M., et al. (2009). Elleuch B., Removal of organic load and phenolic compounds from olive mill wastewater by Fenton oxidation with zero-valent iron. *Chemical Engineering Journal*, 150: 391-395. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.017>
- Cokay, E., y Kargi, F. (2007) E. C. Color, TOC and AOX removals from Pulp Mill Effluent by Advanced Oxidation Process: A comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, 139: 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.023>
- Kavitha, V., y Palanivelu, K. (2004). The role of ferrous ion in Fenton and photo-Fenton processes for the degradation of phenol. *Chemosphere*, 55(9): 1235-1243. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.12.022>
- Khatri, P.K.; Jain, S.L., y Sain, B. (2011). Ultrasound-Promoted Oxidation of Sulfides with Hydrogen Peroxide under Catalyst-Free Conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(2): 701-704. <https://doi.org/10.1021/ie1013426>
- Khosa, M., et al. (2013). Efficiency of Aluminum and Iron Electrodes for the Removal of Heavy Metals [(Ni (II), Pb (II), Cd (II))] by Electrocoagulation Method. *Journal of the Korean Chemical Society*, 57(3): 316-321. <https://doi.org/10.5012/jkcs.2013.57.3.316>
- Kreetachat, T., et al. (2007). Effects of Ozonation Process on Lignin-derived Compounds in Pulp and Paper Mill Effluents. *Journal Effluents of Hazardous Materials*, 142: 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.011>
- Legrini, O.; Oliveros, E. y Braun, A. M. (1993). Photochemical Processes for Water. *Chemical Reviews*, 93: 671-698 de <https://doi.org/10.1021/cr00018a003>
- Li, C.; Gao, N., y Li, W. (2011). Photochemical degradation of typical herbicides simazine by UV/H2O2 in aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 36(1-3): 197-202. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2410>
- López-Ramírez, M. A., et al. (2019). Treatment of Leachates of a Controlled Landfill in Veracruz by Using the Fenton Method. *Nature Environment and Pollution Technology*, 18(1): 1-8 de <https://n9.cl/kfp2r>
- Lopez-Lopez, A.; Pic, J. S., y Debellefontaine, H. (2007). Ozonation of Azo Dye in a Semi-batch reactor: A Determination of the Molecular and Radical Contributions. *Chemosphere*, 66: 2120-2126. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.025>

- Mahamuni, N.N., y Adewuyi, Y.G. (2010). Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for waste water treatment: A review with emphasis on cost estimation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17: 990-1003. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.09.005>
- Mahmoud, A., y Hoadley, A. (2012). An evaluation of a hybrid ion exchange electro dialysis process in the recovery of heavy metals from simulated dilute industrial wastewater. *Water Research*, 46: 3364-3376. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.039>
- Meas, Y., et al. (2010). Industrial wastewaters treated by electrocoagulation. *Electrochimica Acta*, (55)27: 8165-8171. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.05.018>
- Mercado, I. D.; González, G., y Valencia, S. G. (2013). Remoción de níquel y DQO presentes en las aguas residuales de la industria automotriz mediante electrocoagulación. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 10(9): 13-21. <https://n9.cl/ohc7r>
- Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista Colombiana de Física*, 34(2): 484-487
- Mounteer, A.; Mokfienski, J., y Amorim, F. (2005). Remoção de Matéria Orgânica Recalcitrante de Efluentes de Celulose Kraft de Branqueamento por Ozonólise. *O Papel*, 66: 64-70. <https://n9.cl/w3pv>
- Perez, M., et al. (2002). Removal of organic contaminants in paper pulp treatment effluents under Fenton and photo-Fenton conditions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 36: 63-74. <https://n9.cl/jnv65>
- Ollis, D., y Al-Ekabi, H. (1983). *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*. Amsterdam: Elsevier <https://n9.cl/6efxu>
- Ovhal, S.D.; Sheetal, D., y Thakur, P. (2010). Kinetics of photocatalytic degradation of methylene blue in a TiO₂ slurry reactor. *Research Journal Of Chemistry And Environment*, 14(4): 9-13. <https://n9.cl/env5f>
- Pignatello, J.J.; Oliveros, E., y MacKay, A. (2006). Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(1): 1-84. <https://doi.org/10.1080/10643380500326564>
- Pokhrel, D., y Viraraghavan, T. (2004). Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater-A Review. *Science of the Total Environment*, 333: 37-58. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017>
- Poyatos J. M., et al. (2010). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art'. *Water, Air and Soil Pollution*, 205: 187-204. <https://n9.cl/plf2w>
- Rodríguez, T.; Botelho, D., y Cleto, E. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 46: 24-38. <https://n9.cl/ysxv7>
- Saatci, Y. (2010). Decolorization and Mineralization of Remazol Red F3B by Fenton and Photo-Fenton Processes. *Journal of Environmental Engineering*, 136(9): 1000-1005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000226](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000226)
- Sadyrbaeva, T. (2014). Recovery of Cobalt(II) by the Hybrid Liquid Membrane- Electro dialysis-Electrolysis Process. *Electrochimica Acta*, 133: 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.04.025>
- Salas G. (2010). Tratamiento por oxidación avanzada (reacción Fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 13 (1): 30-38. <https://n9.cl/u0nra>
- San Sebastian, N., et al. (2003). Pre-oxidation of an extremely polluted industrial wastewater by the Fenton's reagent. *Journal of Hazardous Materials*, 101: 315-322. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00207-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00207-3)
- Sanz, J.; Lombraña, J. I., y De Luis, A. (2013). Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias. *Afinidad LXX*, 561: 25-33. <https://n9.cl/3hrea>
- Sarria, V. M., et al. (2005). Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. *Revista Colombiana de Química*, 34(2): 161-173. <https://n9.cl/y16v>
- Sharma, V. K., et al. (1999). Ferrate(VI) Oxidation of Thiourea. *Environmental Science & Technology*, 33: 2645-2650. <https://doi.org/10.1021/es981083a>
- Taylor, J., y Wiesner, M. (2002). Membranas. Capítulo 11. En AWWA. *Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de suministros de Agua Comunitaria*. McGraw Hill. <https://n9.cl/g922q>

- Teixeira, C. P. (2002). *Estudio comparativo de tipos diferentes de procesos oxidativos avanzados* (tesis de doctorado). Universidad Estatal de Campinas, Brasil. <https://n9.cl/ykcg9>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (1998). *Handbook of Advanced Photochemical Oxidation Processes*. Washington DC de <https://n9.cl/xb7r3>
- Degrémont. (1991). *Water Treatment Handbook*. Editorial Lavoisier Publishing.
- Zhao, D.; Cheng, J., y Hoffmann, M.R. (2011). Kinetics of microwave-enhanced oxidation of phenol by hydrogen peroxide, *Front. Environmental Science and Engineering*, 5(1): 57-64. <https://doi.org/10.1007/s11783-010-0251-9>