



Desinfección de agua mediante el uso de tecnologías emergentes basadas en procesos avanzados de oxidación

J. H. Castillo-Ledezma*, A. López-Malo Vigil, E. R. Bandala

*Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental. Universidad de las Américas, Puebla.
Sta. Catarina Mártir, Cholula, Puebla. 72810. México*

Resumen

La disponibilidad de agua segura para consumo humano es esencial para la conservación de la salud, y es bien conocido que su contaminación disminuye la calidad de vida del público usuario. A pesar de la eficacia de las tecnologías convencionales utilizadas para la desinfección de agua, estos poseen también serias desventajas tales como altos costos de operación y toxicidad de los derivados residuales. Como respuesta a estas problemáticas, se lleva a cabo investigación para el desarrollo de técnicas de desinfección innovadoras, accesibles, eficaces y socialmente aceptables. Entre ellas destacan los procesos avanzados de oxidación; en los cuales, se generan intermediarios altamente reactivos, mismos que pueden provocar la oxidación de contaminantes y promover la desinfección de organismos patógenos residuales en el agua. El presente trabajo se enfoca en los alcances obtenidos en esta área de investigación y pretende dar a conocer la problemática actual del agua, enfatizando las tecnologías emergentes para su desinfección, basadas en procesos avanzados de oxidación.

Palabras clave: desinfección, procesos avanzados de oxidación, radicales libres, reacción de Fenton, fotocatalisis.

Abstract

Availability of safe drinking water is essential for human health maintenance and disease prevention. It is also well documented that its pollution decreases the user's quality of life. Despite the effectiveness of conventional technologies there are increasing concerns about their high operating costs and residual toxicity of the derivatives generated. Therefore, to these needs, research is held for the development of innovative, accessible, effective and socially acceptable disinfection techniques. These methodologies include advanced oxidation processes, in which, highly reactive intermediates are generated which may cause the oxidation of pollutants and promote disinfection of pathogenic species present in water. This work focuses on achievements in this area of research and disseminates current water issues, emphasizing the emerging technologies for water disinfection based on advanced oxidation processes.

Keywords: disinfection, advanced oxidation processes, free radicals, Fenton reaction, photocatalysis.

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Tel.: +52 222 229 2126, fax: +52 222 229 2727
Dirección electrónica: jordanah.castillola@udlap.mx

Introducción

La gestión racional del agua es un tema crucial para el desarrollo de las naciones y su contaminación induce problemas sociales, económicos y de salud que pueden afectar seriamente el desarrollo económico de un pueblo.

La contaminación del agua, por diversos agentes biológicos (microorganismos) o compuestos orgánicos tóxicos, es responsable de la disminución en la calidad de vida de la población. Las deficiencias en los sistemas de distribución de agua son comúnmente asociadas con enfermedades adquiridas por la ingesta de agua contaminada y estas enfermedades son responsables de aproximadamente el 30% de los casos de muerte por enfermedades transmitidas por el consumo de agua en América Latina; seis veces más que el porcentaje reportado en países desarrollados. Según datos de la Organización Mundial de la Salud, alrededor de 80,000 niños mueren cada año en América Latina por enfermedades asociadas a las diarreas que, generalmente, son originadas por las condiciones insalubres del agua (Gisela *et al.*, 2009).

El suministro de agua potable conlleva problemáticas muy complejas que se acentúan por la falta de técnicas efectivas, accesibles y amigables con el ambiente. De aquí se ha derivado la importancia de desarrollar tecnologías innovadoras, simples, eficaces, de bajo costo y socialmente aceptables para la desinfección/potabilización del agua.

En respuesta a la preocupación pública acerca de los problemas de salud generados por la contaminación del agua y a la demanda de agua de calidad por parte de la población, la comunidad científica ha investigado la eficacia de diversas metodologías aplicables al tratamiento de desinfección/potabilización del agua.

En la actualidad se utilizan tecnologías convencionales como la aplicación de cloro y la ozonación para la desinfección del agua.

Sin embargo, debido a sus altos costos de operación, a la creciente preocupación sobre la toxicidad de los derivados residuales y a las desventajas propias de cada tipo de tratamiento, tales como: condiciones de operación y resistencia de los contaminantes, se ha detectado la necesidad de desarrollar métodos alternativos de desinfección capaces de llevar a cabo la generación de agua segura sin las desventajas de los métodos convencionales.

Entre estas metodologías alternativas, los procesos avanzados de oxidación (PAO) han emergido como técnicas prometedoras aplicables en la desinfección del agua. Los PAO son métodos innovadores, eficaces y de bajo costo, basados en catálisis y fotoquímica, en los que recientemente se han conseguido interesantes progresos.

Estas tecnologías se basan en la generación de intermediarios altamente reactivos; radicales hidroxilos, los cuales inician una secuencia de reacciones que provocan la oxidación de compuestos orgánicos y promueven la desinfección.

Entre los PAO se pueden mencionar las reacciones de Fenton, foto-Fenton, fotocátalisis y fotocátalisis heterogénea. Recientemente se ha logrado incrementar la eficacia de estos procesos de desinfección, al utilizar el espectro visible de la radiación solar como fuente para la generación de radicales. Estos intermediarios oxidan y mineralizan los compuestos orgánicos peligrosos e inactivan a los microorganismos patógenos presentes en el agua. Esto ha convertido a los PAO en tecnologías prometedoras para la purificación del agua.

Resulta importante recalcar la existencia de una vasta serie de estudios científicos que demuestran la viabilidad de la destrucción de casi todos los tipos de compuestos peligrosos y microorganismos, mediante la aplicación de procesos avanzados de oxidación (Tryba, 2008).

Este trabajo se enfoca en los avances obtenidos en esta creciente área de investigación y da a conocer la problemática actual del agua, haciendo énfasis en los procesos avanzados de oxidación utilizados como metodologías novedosas para la desinfección del agua.

Revisión bibliográfica

1. Problemática ambiental del agua

La disponibilidad del agua potable representa un problema importante que enfrenta la humanidad y requiere resolverse adecuadamente. En el sureste de Europa, el Este Medio, Asia Central y África, el agua es un recurso limitado y, debido al cambio climático global, continúan disminuyendo las reservas, mientras que en extensas partes del hemisferio norte grandes cantidades de agua se encuentran disponibles. Además, debido a la pobreza y al crecimiento demográfico, los países en desarrollo resultan especialmente afectados por la falta de agua. De cualquier manera, los problemas no sólo se originan por la falta de este líquido vital, sino por su contaminación (Backhaus *et al.*, 2009).

Mundialmente, existe una gran preocupación por el incremento en los niveles de contaminación de los sistemas de agua por compuestos químicos producidos por las actividades en ciudades, industrias y por los residuos derivados de labores o procesos agrícolas (De la Hoz *et al.*, 2007).

Toda industria que consume agua tendrá algún efluente líquido y la calidad de los efluentes dependerá completamente del proceso industrial (CGIAB, 2010). Por tanto, la gran variedad de procesos industriales genera un amplio abanico de efluentes contaminantes. Entre los efluentes producidos por las principales industrias contaminantes se pueden mencionar (EUPS, 2010):

a) Industria del petróleo. Los efluentes generados presentan sosa, sulfuros, fenoles, compuestos orgánicos disueltos, parafinas, alcoholes pesados, benceno, cianuros, acetonitrilos y metales, entre otros.

b) Tenerías. Este sector industrial emplea taninos vegetales o sales de cromo para los procesos de curtición que se encuentran en sus vertidos. Sus efluentes contienen: proteína, coloides, grasas, pelos y colorantes compuestos con cloro y azufre.

c) Industria textil. Sus efluentes contienen sólidos en suspensión, grasas, sales orgánicas, tintes y colorantes. Las lavanderías generan efluentes con alta contaminación compuesta fundamentalmente de productos de lavado (carbonato sódico, tripolifosfato, jabones, detergentes biodegradables).

d) Industria del acero. Los efluentes generados presentan alto contenido de óxidos, sólidos en suspensión, hidrocarburos insolubles en amoníaco, hierro II, zinc, plomo, ácido sulfúrico, aceites y sólidos en suspensión.

e) Industria automotriz. En general este tipo de agua presenta metales pesados como plomo, cromo VI, detergentes, grasas y sólidos en suspensión.

f) Industria energética. Dentro de este sector se consideran las plantas térmicas y nucleares, los sistemas de limpieza de gases y de gasificación, la minería del carbón y el reprocesado de combustibles irradiados. Los

efluentes presentan contaminación por hidrocarburos, sólidos en suspensión, cianuros, gases ácidos, metales pesados, y compuestos radioactivos.

g) Industria metalúrgica. Incluye la industria del aluminio, oro, uranio, y zinc. Los contaminantes más habituales son: carbono, fluoruros, metales, sosa, cianuros y disolventes.

h) Industria química. Se incluyen sectores de características muy diferentes como la industria del cloro, amoníaco, urea, farmacéutica y de tintes.

i) Industria cosmética. Sus efluentes presentan altos niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO), grasas y detergentes aniónicos y no iónicos.

j) Industria de adhesivos. Genera efluentes con copolímeros vinílicos y alta DQO.

k) Industria de explosivos. Sus efluentes presentan coloración, compuestos no biodegradables y acidez alta.

l) Industria agroalimentaria. Las características principales de la carga contaminante son el alto contenido de materia orgánica, en especial fermentados, azúcares, almidones y otros carbohidratos. También se originan altos contenidos de sólidos no disueltos como huesos, cáscaras y hojas. Las descargas son altas en Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), coliformes totales y fecales (IMTA, 2010).

2. Importancia de la desinfección del agua

La presencia de microorganismos patógenos y compuestos contaminantes en el agua puede causar enfermedades, es por esto que surge la necesidad de implementar técnicas que

reduzcan los riesgos asociados a esta contaminación.

Los sistemas de desinfección de agua son metodologías que tienen por objetivo reducir la carga de contaminantes muy específicos y microorganismos patógenos presentes en los efluentes que se descargarán en el ambiente.

La desinfección se utiliza sobre todo si se pretende realizar posteriormente una reutilización del agua.

El mejor método para eliminar contaminantes es prevenir su presencia en primera instancia; sin embargo, esto no siempre es posible. Actualmente existe una gran variedad de métodos utilizados para reducir los contaminantes y cada uno de ellos presenta diferentes ventajas y desventajas.

Las aguas contaminadas por la actividad humana, en general, pueden ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción de carbón activado u otros adsorbentes, como también por tratamientos químicos convencionales, oxidación térmica, cloración, ozonación, entre otros (De la Hoz *et al.*, 2007).

3. Tecnologías convencionales utilizadas en desinfección de agua

Los métodos tradicionales para reducir la contaminación involucran tratamientos biológicos, químicos y físicos, y la eficacia de cada método depende del tipo de tratamiento, condiciones de operación, corrosión de equipos, fisiología de los microorganismos, concentración y tiempo de exposición a los reactivos, pH, temperatura, y resistencia de los contaminantes.

A continuación se presentan las principales ventajas y desventajas de la cloración y ozonación como metodologías convencionales aplicadas en desinfección de agua:

a) Uso de cloro (hipoclorito, cloruro de sodio acidificado, dióxido de cloro). Son sistemas utilizados comúnmente. No obstante, altas concentraciones de materia orgánica pueden inhibir la eliminación de patógenos y generar subproductos clorados con efectos adversos potenciales para la salud.

También resulta importante considerar que el uso de estos reactivos provoca corrosión de los equipos, son dependientes del pH, sensibles a la temperatura, el aire, los metales y a la concentración de materiales orgánicos, en diferente medida, respecto a cada reactivo clorado. Además, algunas bacterias y huevos de protozoarios son resistentes a esta metodología de desinfección. El ácido hipocloroso es la forma de cloro libre disponible que exhibe la actividad bactericida más alta contra una amplia variedad de microorganismos (Parish *et al.*, 2003).

No obstante, durante los últimos años la capacidad del cloro para inactivar microorganismos patógenos e inhibir su crecimiento ha sido puesta en perspectiva con respecto a sus efectos sobre la salud humana, debido a la generación de subproductos tóxicos. Estos compuestos aparecen durante el proceso de desinfección, cuando el cloro reacciona con la materia orgánica natural presente en la superficie del agua y con la materia orgánica de los efluentes residuales, generándose trihalometanos y ácidos haloacéticos, entre otros compuestos clorados, que exhiben un alto potencial carcinogénico y mutagénico (Backhaus *et al.*, 2009).

b) Uso de ozono. Es una metodología comúnmente utilizada para desinfección de agua. Su uso es efectivo a bajas concentraciones y tiempos de exposición cortos. El ozono es muy reactivo por lo que su espectro es amplio y oxida la mayoría del material orgánico con el que entra en contacto, incluyendo protozoarios, por lo que elimina la mayoría de microorganismos patógenos.

El proceso exhibe buena habilidad de penetración. Por otra parte, entre sus desventajas se puede mencionar la inestabilidad del sistema y que es altamente reactivo; por lo que debe ser producido en su sitio de uso. Otra desventaja del ozono es su alto costo de operación y la necesidad de personal capacitado para operar el sistema, además de provocar corrosión de los equipos (Parish *et al.*, 2003).

4. Procesos avanzados de oxidación como tecnologías emergentes de desinfección de agua

Entre los diversos tratamientos convencionales existentes, el cloro ha sido utilizado ampliamente como agente de desinfección por más de un siglo debido a su bajo costo y alta eficacia.

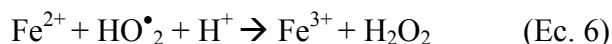
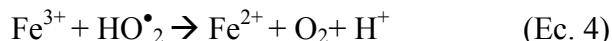
En años recientes ha aumentado el interés por desarrollar metodologías de desinfección alternativas, que no generen subproductos peligrosos y cuenten con otras características deseables como alta eficacia y bajos costos de operación.

Entre estas metodologías alternativas, los procesos avanzados de oxidación (PAO) emergen como técnicas prometedoras. Los PAO, definidos como aquellos procesos que involucran la generación de radicales hidroxilo para efectuar la purificación del agua (Parsons, 2005; Gottschalk *et al.*, 2000), han demostrado ser eficientes e incrementar la cinética de degradación y el nivel de biodegradabilidad de muchos microorganismos, surfactantes y otros compuestos orgánicos (Metcalf y Eddy, 2003).

Los PAO por lo general se clasifican de acuerdo con la fase en la que se lleva a cabo la reacción, siendo homogénea o heterogénea; o de acuerdo al método de generación del radical hidroxilo que puede ser químico, electroquímico o fotoquímico (Peralta *et al.*, 2007).

4.1 Reacción de Fenton

Es un proceso que utiliza H_2O_2 con la adición de iones Fe^{2+} . La combinación de hierro ferroso y peróxido de hidrógeno promueven una serie de reacciones en cadena, representadas en las ecuaciones 1 a 9.

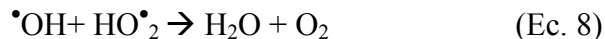
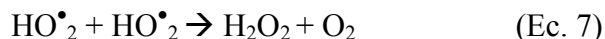


Los radicales pueden reaccionar con el fierro o con cualquier sustancia orgánica presente. El radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) es la especie más oxidante después del flúor; y puede oxidar los compuestos orgánicos más rápido que el ozono.

Además, estas reacciones propagan el ciclo en cadena, mediante la generación de otros tipos de radicales; superóxido y su ácido conjugado; quienes pueden reducir nuevamente el fierro III a fierro II (ecuación 4) o terminar la cadena por la oxidación de Fe II (ecuaciones 5 y 6).

También existen reacciones adicionales que pueden terminar la cadena. Estas reacciones incluyen los caminos de recombinación de los radicales (ecuaciones 7 a 9) (Crittenden *et al.*, 1999; Duesterberger *et al.*, 2005).

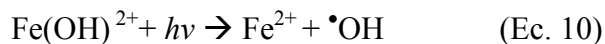
Cabe señalar que este proceso se lleva a cabo en un intervalo de pH 2-4 (Esquivel, 2008).



4.2 Reacción de foto-Fenton

La reacción de foto-Fenton es una tecnología ambientalmente atractiva para la degradación de contaminantes tóxicos orgánicos (Xiejun *et al.*, 2005). Recientemente se ha demostrado que el uso de Fe III y H_2O_2 , con la aplicación de radiación UV es una alternativa efectiva para la degradación de contaminantes orgánicos (Kusic *et al.*, 2006; Kwan y Chu, 2003).

El proceso se acelera debido a que se facilita la generación de radicales hidroxilo. La descomposición del $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ incrementa la eficacia del proceso al proveer una fuente adicional de radicales $\bullet\text{OH}$ (Kusic *et al.* 2006; Kwan y Chu, 2003) a partir de la reacción convencional de Fenton o por fotólisis de iones Fe III en disolución; como se muestra en la ecuación 10. Estos radicales se han propuesto como las principales especies reactivas para la oxidación y mineralización de varios contaminantes orgánicos presentes en el agua (Xuejun *et al.*, 2005).



Alternativamente, en presencia de radiación, el peróxido de hidrógeno en disolución puede ser fotolizado liberando $\bullet\text{OH}$ como se muestra en la ecuación 11 (Kusic *et al.*, 2006; Kwan y Chu, 2003).



La reacción de foto-Fenton ha sido aplicada exitosamente en muchos estudios para la destrucción de residuos orgánicos peligrosos,

como nitrobenzeno, colorantes y herbicidas (Xiejunet *al.*, 2005).

4.3 Fotocatálisis

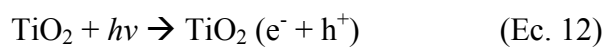
Se ha reportado que la energía solar puede ser utilizada efectivamente en la desinfección de agua, dado que la inactivación de los microorganismos se alcanza, ya sea calentando el agua a altas temperaturas, por arriba de 70°C, o exponiéndola cerca del intervalo UV (300-400nm) del espectro electromagnético (Rodríguez *et al.*, 2007).

Esta radiación provoca daños en diversos componentes celulares y en la estructura genética de los microorganismos patógenos, inhibiendo su reproducción. El uso de la energía solar en procesos de desinfección, resulta muy atractivo por la disponibilidad de esta fuente. Sin embargo, únicamente el 7% del espectro solar está conformado por radiación UV mientras que la región visible representa cerca del 45%.

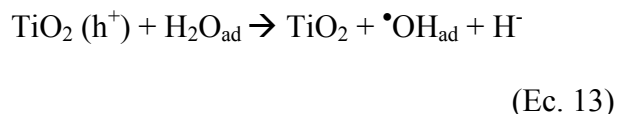
Serpone y Emeline (2002) definen la fotocátalisis como la aceleración de una fotoreacción por la acción de un catalizador.

La fotocátalisis solar es un proceso avanzado de oxidación que utiliza la radiación solar para la producción de radicales hidroxilo (Malato *et al.*, 2002) y utiliza principalmente dióxido de titanio como fotocatalizador. Uno de los principales usos de esta tecnología está en el tratamiento microbiológico del agua, dado su efecto bactericida (De la Hoz, 2009).

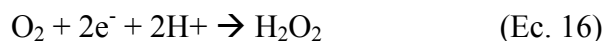
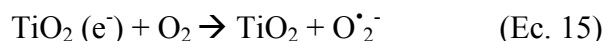
En este esquema, la radiación conduce a la formación de pares hueco-electrón, promoviendo un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción del dióxido de titanio (ecuación 12).



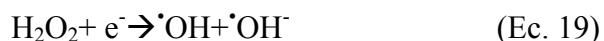
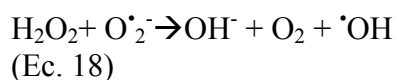
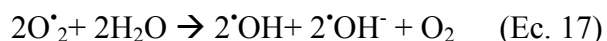
El hueco en la banda de valencia genera radicales hidroxilo cuando una molécula de agua es adsorbida (ad) en la superficie del catalizador o por oxidación de los iones oxidrilo (ecuaciones 13 y 14).



Por otra parte, el electrón en la banda de conducción reduce el oxígeno para generar radicales superóxido que pueden ser parcialmente protonados (ecuación 15).



En donde a partir del peróxido de hidrógeno y del radical superóxido se generan radicales libres mediante las ecuaciones 17 a 19.



Finalmente, la desinfección tiene lugar cuando los microorganismos son atacados por los radicales $\bullet\text{OH}$ y $\text{O}_2^{\bullet -}$ conocidos como especies reactivas de oxígeno (ROS).

La velocidad de reacción general del proceso se determina por las tasas de formación de los pares hueco-electrón, de la formación de las ROS a partir de las especies adsorbidas y de la recombinación hueco-electrón y el posible control de la adsorción o transferencia de masa de la solución (Backhaus *et al.*, 2009).

Dado que los oxidantes producidos son de alto poder y no discriminan, poseen el potencial de eliminar la mayoría de los microorganismos y de degradar o mineralizar la mayoría de los contaminantes orgánicos presentes en el agua (De la Hoz *et al.*, 2007).

El mecanismo de acción mediante el cual se alcanza la desinfección de los microorganismos aún no se conoce con detalle. Sin embargo, Kiwi y Nadtochenko (2004 y 2005) y Nadtochenko *et al.* (2004) han reportado diversas modificaciones que tienen lugar en estructuras celulares como la pared y la membrana de los microorganismos. Se ha comprobado que el proceso se basa en la promoción de la oxidación directa de los fosfolípidos poliinsaturados componentes de la membrana. El daño en la pared celular favorece el acceso de los ROS a la membrana y la intrusión de las partículas de titanio al interior de las células. Estas fallas conducen a la muerte de los microorganismos por problemas de la actividad respiratoria, oxidación de enzimas y liberación del contenido celular (Backhaus *et al.*, 2009).

Entre los diversos materiales que se han desarrollado para aplicaciones fotocatalíticas, el dióxido de titanio ha recibido gran atención debido a que no es tóxico y tiene alta actividad fotocatalítica, termoestabilidad y bajo costo (Backhaus *et al.*, 2009), además de ser inocuo, económico y reciclable. No obstante, debido a su amplia brecha de banda (3.2 eV), este catalizador exhibe actividad únicamente con radiación UV.

Esto es de gran interés debido a que se pueden generar materiales basados en TiO_2 modificado, de tal forma que se incremente su sensibilidad a los fotones del espectro solar visible. Si el semiconductor utilizado tiene una separación apropiada entre sus bandas de valencia y conducción, ésta puede ser superada por la energía contenida en un fotón del espectro visible; lo que incrementaría su

actividad fotocatalítica y haría más eficaz el proceso de desinfección.

Por lo antes mencionado, en años recientes ha crecido el interés en aumentar la respuesta óptica del TiO_2 del espectro UV al visible, con el fin de incrementar la eficacia de la fotocatalisis por TiO_2 . Dopar selectivamente el catalizador es una de las estrategias más efectivas para cambiar la estructura intrínseca de la banda de TiO_2 , lo cual puede promover la actividad fotocatalítica incrementando la sensibilidad a la luz solar.

Actualmente se llevan a cabo investigaciones en las que se combinan las reacciones de Fenton y fotocatalisis heterogénea, mediante el diseño de catalizadores compuestos por dióxido de titanio y hierro, entre otros elementos. Los resultados en desinfección de agua se muestran prometedores.

Algunos ejemplos de aplicación de procesos de descontaminación fotocatalítica son el tratamiento de aguas residuales conteniendo formaldehídos provenientes de laboratorios veterinarios (Araña *et al.*, 2004), y el tratamiento de efluentes provenientes de plantas papeleras (Machado *et al.*, 2003). Casos interesantes de mencionar son las experiencias en la Plataforma Solar de Almería (PSA, España) en donde se utiliza fotocatalisis solar para el tratamiento del agua, el desarrollo de dióxido de titanio modificado (Xie y Yuan, 2004) y el acople de tecnologías basadas en radiación solar con tratamientos biológicos (Sarria *et al.*, 2003).

También se destacan las experiencias reportadas por Litter y Mansilla (2003 a y b) en el marco del proyecto OEA AE 141/2001 de la Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo, sobre desinfección solar y remoción de arsénico de aguas en comunidades rurales de América Latina.

Conclusiones

A pesar de los avances alcanzados en tecnologías para desinfección de agua, el incremento constante de sus niveles de contaminación obliga al desarrollo de nuevas metodologías que garanticen la disponibilidad de agua segura para consumo humano.

Considerando las ventajas de utilizar la energía solar en combinación con las reacciones de Fenton, foto-Fenton y fotocatalisis heterogénea para desinfección, durante los últimos años, la investigación y el desarrollo en procesos avanzados de oxidación se han convertido en temas con gran relevancia.

Un punto de interés comprende la generación de nuevos materiales semiconductores para su uso como catalizadores sensibles al espectro solar visible, que incrementen la eficiencia de los procesos fotocatalíticos para ser utilizados en inactivación microbiana y degradación de contaminantes.

Con base en lo antes mencionado se pronostica que la comunidad científica internacional continuará observando el desarrollo y la inversión en esta área, de la cual se posee vasta información, que no obstante, resulta insuficiente aún para su aplicación óptima.

Agradecimientos

J. H. Castillo-Ledezma agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad de las Américas Puebla, por el financiamiento de sus estudios de posgrado.

Referencias

- Araña, J., Martínez, J. L., Herrera, J. A., Rodríguez, J. M., Pérez, J., Bergasa, O., Álavarez, C. y Méndez, J. 2004. Photocatalytic degradation of formaldehyde containing wastewater from veterinarian laboratories. *Chemosphere*. 55(6):893-904.
- Bakhaus, K., Marugán, J., van Grieken, R. y Sordo, C. 2009. Photocatalytic inactivation of *E. faecalis* in secondary wastewater plant effluents. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. España. *Contaminación de aguas por la industria*. <http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/SituacionX/CONTAMINACION.htm>, accesada 22/2/2010.
- Crittenden, C., Hu, S., Hand, D. y Green, S. 1999. A kinetic model for H₂O₂/UV process in a completely mixed batch reactor. *Water Research*. 33(10):2315-2328.
- De la Hoz, F., Rivera, D., Arumil, J. y Mansilla, H. 2007. Avances en la desinfección de agua de riego por fotocatalisis solar: Desarrollo experimental y resultados preliminares. *Gestión Ambiental*. 14:1-13.
- Duesterberg, C. K., Cooper, W. J. y Waite, T. D. 2005. Fenton-mediated oxidation in the presence and absence of oxygen. *Environmental Science and Technology*. 39(13):5052-5058.
- Esquivel, K. 2008. *Desarrollo de un electrodo a base de fibra óptica recubierto con TiO₂ incorporado en un reactor fotoelectroquímico para el tratamiento de efluentes acuosos contaminados con colorante textil mediante procesos electroquímicos de oxidación avanzada*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C. CIDETEQ. Qro. México. pp. 98.
- EUPS (Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla. Grupo Tar). 2010. *Tipos de aguas residuales industriales*. http://prueba2.aguapedia.org/master/ponencias/modulo1/ponencias_modulo01_master_0406/ari_generalidades.pdf, accesada 20/2/2010.
- Gisela, K., Calderón, G., Schneider, S., Domínguez, W. y Gutiérrez G. 2009. *Informe técnico sobre ingeniería agrícola y alimentaria*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <ftp://ftp.fao.org/docrep/FAO/011/i0480s/i0480s.pdf>, accesada 24/2/2010.

- Gottschalk, C., Libra, J. y Saupe, A. 2000. *Ozonation of water and wastewater*. Wiley-VCH, Alemania. pp. 9, 11-18, 30, 148, 149.
- IMTA. 2010. *Agua para producción de alimentos*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2010. http://www.imta.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=180:agua-para-produccion-de-alimentos&catid=52:enciclopediadelagua&Itemid=80, accesada 22/2/2010.
- Kiwi, J. y Nadtochenko, V. 2004. New evidence for TiO₂ photocatalysis during bilayer lipid peroxidation. *Journal of Physical Chemistry B*. 108(45):17675-17684.
- Kiwi, J. y Nadtochenko, V. 2005. Evidence for the mechanism of photocatalytic degradation of the bacterial wall membrane at the TiO₂ interface by ATR-FTIR and laser kinetic spectroscopy. *Langmuir*. 21(10):4631-4641.
- Kusic, H., Koprivanac, N., Loncaric, B. y Selanec, I. 2006. Photo-assisted Fenton type processes for the degradation of phenol: A kinetic study. *Journal of hazardous Material*. 136(3):632- 644.
- Kwan, C. Y. y Chu, W. 2003. Photodegradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in various iron-mediated oxidation systems. *Water research*. 37(18):4405-4412.
- Litter, M. y Mansilla, H. 2003a. *Desinfección Solar de aguas en Comunidades Rurales de América Latina*. Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo. Proyecto OEA AE 141/2001. Documento técnico.
- Litter, M y Mansilla, H. 2003b. *Remoción de arsénico asistida por luz solar en comunidades rurales de América Latina*. Agencia Interamericana para la Cooperación y el Desarrollo. Proyecto OEA AE 141/2001. Documento Técnico.
- Machado, A., De Miranda, J., De Freitas, R., Thomas, E., Duarte, F., Ferreira, L., Albuquerque, Y., Ruggiero, R., Sattler, C. y De Oliveira, L. 2003. Destruction of the organic matter present in effluent from a cellulose and paper industry using photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 155(1-3):231- 241.
- Malato, S., Blanco, J., Vidal, A. y Richter, C. 2002. Photocatalysis with solar energy at a pilotsacle: an overview. *Applied Catalysis B: Environmental*. 37(1):1-15.
- Metcalf y Eddy. 2003. *Eastwater engineering. Treatment and reuse*. Cuarta edición. MacGraw Hill, NY, EE.UU. pp. 1196-1201.
- Nadtochenko, V., Rincón, A., Stanca, S. y Kiwi, J. 2004. Dynamics of *E. coli* membrane cell peroxidation during TiO₂ photocatalysis studied by ATR-FTIR spectroscopy and AFM microscopy. *Journal photochemistry and photobiology A: Chemistry*. 169(2):131-137.
- Parish, M. E., Beuchat, L.R., Suslow, T. V., Harris, L.J., Garrett, E. H., Farber, J. N. y Busta, F. F. 2003. Methods to reduce/eliminate pathogens from fresh and fresh-cut produce. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 5(2):161-173.
- Parsons, S. 2005. *Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment*. IWA Publishing. Londres, Reino Unido. pp. 1-5, 138-139.
- Peralta, J. M, Maldonado, M. I., Meas, V., Rodríguez, F., Godínez, L. A y Malato, S. 2007. *Aplicación de procesos electroquímicos de oxidación avanzada para la degradación de compuestos orgánicos en efluentes acuosos*. CIEMAT. Ed. Madrid, España. pp. 17, 23-27, 69-70.
- Rodríguez, C. P., Ziolli, R., L. y Guimaraes, J. R. 2007. Inactivation of *Escherichia coli* in water by TiO₂-assisted disinfection using solar light. *Journal of Brazilian Chemical Society*. 18(1):126-134.
- Sarria, V., Kenfack, S., Guillod, O y Pulgarín, C. 2003. An innovative coupled solar-biological system at field pilot scale for the treatment of biorecalcitrant pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 159(1):89-99
- Serpone, N., Emeline, A. 2002. Suggested terms and definitions in photocatalysis and radiocatalysis. *International Journal of Photoenergy*. 4(3):89-99.
- Tryba, B. 2008. Increase of the Photocatalytic Activity of TiO₂ by Carbon and Iron Modifications. *International Journal of Photoenergy*. Article ID 721824. doi:10.1155/2008/721824.
- Xie, Y y Yuan, Ch. 2004. Photocatalysis of neodymium ion modified TiO₂ sol under visible light irradiation. *Applied Surface Science*. 221(1-4):17-24.
- Xiejun, L., Yiming, X., Kangle, L. y Gencheng, Z. 2005. Photo-assisted degradation of anionic dyes over iron(III)-loaded resin in the presence of hydrogen peroxide. *Journal of photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 173(2):121-127.