

## FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA SOLAR: APLICACIÓN DE PELÍCULAS GRUESAS DE TiO<sub>2</sub> EN LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUA

Julio César Morales Mejía y Rafael Almanza Salgado

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, Distrito Federal, 04510, México, 56233600 ext. 3689, Fax. 56233600 x 8051, ras@pumas.iingen.unam.mx.

### RESUMEN

Se presentan los resultados del uso de un reactor solar semi – piloto operado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para la oxidación fotocatalítica de resorcinol acuoso. El resorcinol, activo en formulaciones tópicas contra el acné, es un contaminante emergente debido a sus posibles efectos en el sistema endocrino humano y a los probados efectos en anfibios y peces. El reactor discontinuo se basa en vidrios sódico-cálcicos recubiertos por películas gruesas de TiO<sub>2</sub> depositadas mediante la técnica sol – gel a 605° C por 2 horas por cada capa aplicada. Se variaron las capas de TiO<sub>2</sub>, la presencia de un receptor de electrones y el pH inicial. El contaminante y los subproductos se cuantificaron mediante espectrofotometría UV – visible. Eficiencias de remoción y cuánticas aparentes, cinéticas de reacción basadas en el tiempo y en la dosis de energía UV-A solar recibida fueron obtenidas. La eficiencia de remoción ha sido de hasta 90 % y los subproductos cuantificables fueron removidos hasta niveles no detectables en algunas condiciones. La cinética puede describirse satisfactoriamente mediante el modelo de Langmuir – Hinshelwood con respecto al tiempo y la energía.

### ABSTRACT

We present results on the use of a semi-pilot scale solar reactor that was operated for photocatalytic oxidation of aqueous resorcinol at Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Resorcinol, active ingredient in topical formulations against acne, is an emerging pollutant because of its potential effects on human endocrine system and the proven effects on amphibians and fish. The batch reactor is based on soda lime glass that was coated with thick TiO<sub>2</sub> films deposited by sol – gel, sintering at 605 ° C and 2 hours for each layer applied. We varied layers of TiO<sub>2</sub>, the presence of an electron acceptor and the initial pH. The contaminant and its oxidation by-products were quantified by UV - visible spectrophotometry. Quantum efficiencies of removal and apparent reaction kinetics based on the time and UV-A solar energy dose were obtained. The removal efficiency was up to 90% and measurable by-products were removed to undetectable levels in some conditions. The kinetics can be described satisfactorily by the Langmuir - Hinshelwood model, either versus time and energy.

### Palabras clave

Fotocatálisis solar, resorcinol, TiO<sub>2</sub>, películas gruesas, sol – gel.

### INTRODUCCION

Actualmente, el panorama energético basado en combustibles fósiles se considera complicado a mediano y largo plazo debido a la drástica reducción de las reservas, a los grandes impactos ambientales asociados a todas las etapas de su gestión, desde la exploración hasta el uso en motores de combustión interna y, dentro de éstos y muy en particular, al cambio climático global causado por el CO<sub>2</sub> emitido durante su combustión. Actualmente, el uso de la energía solar ha ido en aumento debido a factores como el incremento en los costos de los combustibles fósiles y a los impactos ambientales asociados al uso de los mismos. Entre las aplicaciones de la energía solar, como fuente renovable, se tienen el calentamiento de agua, la generación directa e indirecta de vapor, la desinfección de agua para consumo y el tratamiento de efluentes contaminados.

Por otra parte, en México y en el resto del mundo, la disponibilidad del agua de buena calidad para ingesta, aseo, recreación, industria, etc., se ha ido convirtiendo en un tema de creciente importancia debido a la gran diferencia entre su consumo y su tratamiento.

De acuerdo con información Jiménez (2001), en México se trata cerca del 50 % de las aguas residuales municipales generadas a nivel nacional. Por otra parte, SEMARNAT (2011) informa que se trata el 37.1 % de las aguas residuales municipales y sólo el 17 % de las no municipales, incluyendo a las industriales

Durante el tratamiento de aguas residuales, solo algunos procesos avanzados pueden eliminar contaminantes que no son biodegradables y/o que están presentes en muy bajas concentraciones. Varios de éstos contaminantes pueden interferir con el sistema endócrino u hormonal de los anfibios, peces y, potencialmente, el humano. Dichos contaminantes se denominan disruptores endócrinos y son moléculas orgánicas, naturales o sintéticas, que imitan, inhiben o compiten con las hormonas y que pertenecen a un grupo mayor de contaminantes llamado Contaminantes orgánicos emergentes. En particular, en México se han encontrado disruptores endócrinos en aguas de pozo y residuales (Gibson *et al*, 2007), principalmente 4-nonil fenoles, Triclosan, Bisfenol A, DEHP, Estrona, 17-β- estradiol, butil bencil ftalato y 17-α-etinil estradiol.

En este sentido, una molécula aromática de interés como contaminante del agua y disruptor endócrino es el resorcinol o hidroxiquinona (Fig. 1), que es una molécula muy soluble en agua, con un pka<sub>1</sub> = 9.81. El resorcinol es ampliamente usado en los sectores industrial y doméstico en todo el mundo. De acuerdo con

WHO (2006), se usa en la elaboración de hules, adhesivos para madera, retardadores de flama, estabilizadores UV, colorantes, meta-amino-fenoles, tintes para cabello, productos farmacéuticos y otras aplicaciones menores, dando un consumo total de 44,801 toneladas en el año 2001. Además, el resorcinol es una molécula ampliamente presente en la naturaleza con fuentes como las habas, setas, hojas de tabaco (humo de cigarrillos) y como producto secundario de la oxidación de sustancias húmicas.

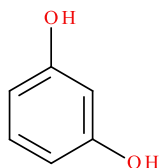


Figura 1. Molécula de resorcinol

En la etapa de uso, los productos farmacéuticos y los tintes para el cabello suman, en partes aproximadamente iguales, el 89 % de las emisiones al agua. En Europa se estima (WHO, 2006) en 150.1 toneladas las emisiones anuales de resorcinol al agua correspondientes al uso de fármacos y tintes. Extrapolando esto a nivel global, se estima en 450 toneladas de este fármaco las emisiones a las aguas residuales municipales anualmente, pero no es posible establecer que la concentración sea siempre baja debido a que esta molécula se vierte al agua en tandas y no de continuo.

La exposición directa o indirecta a compuestos fenólicos como el resorcinol, que en su mayoría son tóxicos, puede afectar además los procesos controlados por hormonas en muchos seres vivos, por lo que varios son incluidos entre los Disruptores Endócrinos (Pardeshi y Patil, 2009; Coleman et al., 2005). En particular, se considera que el resorcinol puede actuar sobre la tiroides, con controversia en que si a bajas dosis tiene o no este tipo de efecto, pero con el hecho de que lo tiene en exposiciones crónicas (WHO, 2006; Lynch et al., 2002).

De entre las opciones para eliminar moléculas de resorcinol de aguas y aguas residuales, la fotocatalisis heterogénea es una opción con alto potencial. La fotocatalisis heterogénea es un proceso en el que un semiconductor recibe radiación con un contenido energético suficientemente elevado como para provocar el salto de un electrón desde su capa de valencia hasta la de conducción, con lo cual se genera un par hueco – electrón. Este hueco ( $h^+$ ) y su electrón ( $e^-$ ) pueden recombinarse o reaccionar con otras especies adsorbidas sobre el semiconductor. Cuando el hueco reacciona con una molécula de agua se forma un radical oxhidrilo ( $OH^\bullet$ ) que será capaz de oxidar moléculas orgánicas presentes porque es la segunda especie química más oxidante. Para evitar la recombinación, es necesaria la presencia de un oxidante que pueda ser reducido por el electrón del par hueco-electrón generado sobre el catalizador. Este oxidante puede ser oxígeno, peróxido de hidrógeno, persulfato de sodio o de potasio, etc. Incluso, puede ser un metal pesado o noble con un potencial de óxido – reducción mayor que el potencial de banda plana del catalizador. Para el caso de  $TiO_2$  como catalizador, es posible reducir hasta su estado metálico en pequeñas partículas. Así, es posible separar y eliminar del agua los metales Ag, Pd, Au, Pt, Hg, Pb, Tl y U (Herrmann, 2005).

Hay varias opciones de semiconductores para efectuar la fotocatalisis, como  $ZnO$ ,  $ZrO_2$ ,  $CeO_2$ ,  $Bi(VO_4)_2$  y  $TiO_2$ . De entre todos, hasta ahora el que más se ha estudiado y utilizado en aplicaciones a niveles laboratorio, piloto e industrial es el dióxido de titanio,  $TiO_2$ . Este semiconductor es estable ante la radiación UV y visible, insoluble en agua y aceptablemente inocuo para la salud humana, salvo en tamaño nanoscópico (Herrmann, 2005).

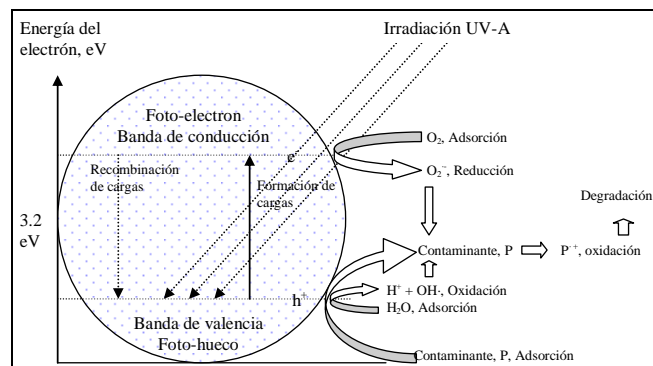


Figura 2. Principio de la fotocatalisis heterogénea

Se sabe que, en general, la oxidación de moléculas orgánicas por fotocatalisis heterogénea sigue una cinética del tipo Langmuir-Hinshelwood, establecida en la ecuación (1):

$$r = \frac{k \cdot K \cdot C}{1 + K \cdot C} \quad (1)$$

Donde  $k$  es la constante cinética,  $K$  es la constante de adsorción del contaminante y  $C$  es la concentración de la molécula orgánica, todas expresadas en unidades congruentes. Si la concentración de sustrato  $C$ , es lo suficientemente baja, es posible y sin incurrir en un error grave, simplificar la Ec. (1) a la forma siguiente (Herrmann, 2005; Houas et al., 2001):

$$r = \frac{k \cdot K \cdot C}{1 + K \cdot C} \approx k \cdot K \cdot C \approx k_{app} \cdot C \quad (2)$$

Cuando se realiza fotocatalisis con el catalizador en suspensión, es necesario incorporar una etapa de separación del catalizador y el agua tratada, lo cual puede ser evitado si el semiconductor se inmoviliza sobre un soporte o sustrato, como vidrio, plástico, carbón activado, etc.

Existen varias técnicas para efectuar el depósito del semiconductor en sustratos. Una de ellas es el proceso Sol – Gel, el cual consiste en la formación de una solución con el metal presente como un alcóxido, para luego formar un gel y sinterizarlo a una temperatura, atmósfera y tiempo tales que permitan la adherencia efectiva sobre el sustrato y favorezcan la formación de la estructura cristalina deseada.

En el presente trabajo se presentan resultados de probar diferentes películas de  $TiO_2$  sobre vidrio sódico – cálcico (vidrio comercial) de 3 mm de espesor, preparadas por el proceso Sol – Gel (Novotna et al., 2010), en la oxidación fotocatalítica de resorcinol a nivel semi – piloto bajo irradiancia solar.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Reactivos

El resorcinol (R5645-100G), el isopropóxido de titanio (205273-500ML), la acetil acetona (P7754-500ML-A) y el tetra etil orto silicato (131903-1L) fueron comprados a Sigma – Aldrich México y se usaron sin otra purificación o tratamiento. El isopropanol (pureza: 99.7 %) se compró a Reasol S.A. y se usó también sin mayor tratamiento.

Las soluciones de resorcinol fueron preparadas en agua desionizada por osmosis inversa en una pequeña planta de purificación de agua para nuestro laboratorio.

### Elaboración de películas

Las películas fueron elaboradas mediante el proceso Sol – Gel convencional, con isopropóxido de titanio como fuente del TiO<sub>2</sub> en el precursor. Este precursor se preparó con base en la metodología presentada por Novotna *et al.* (2010), con la relación molar final del precursor mostrada en la Tabla 1. Se sintetizó por 2 horas en presencia de aire con una tasa de calentamiento de 3.5° C/minuto. Se varió la temperatura de sinterizado desde 500 hasta 675° C.

Compuesto	Moles/mol de Titanio
Isopropóxido de Titanio	1
Acetil acetona	5
Isopropanol	5
Ácido Clorhídrico	0.05

### Reactor

Las pruebas de oxidación fotocatalítica y de fotólisis de resorcinol fueron realizadas en reactores discontinuos tipo balsa (Fig. 3) constituidos por un tanque cilíndrico de polietileno de 1 pulgada de profundidad y 6 pulgadas de diámetro interior, en cuyo fondo se colocaron los vidrios con la cara recubierta con TiO<sub>2</sub> hacia arriba. Aquí se vertieron 300 mL de la solución a detoxificar y por encima de este sistema se recibe la irradiancia UV-visible solar. Se corrieron varias pruebas simultáneas mediante varios de estos reactores.

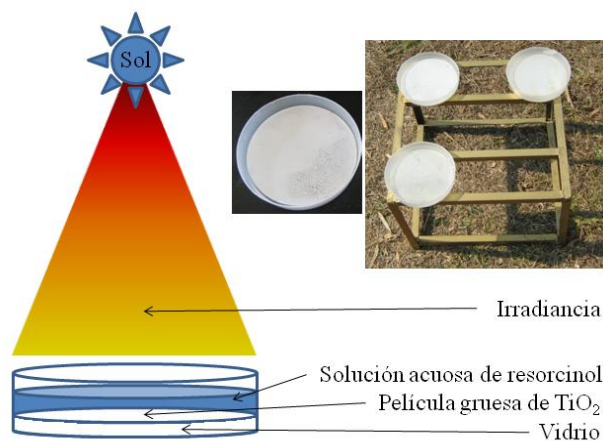


Figura 3. Reactor fotocatalítico semi .piloto

### Análisis químicos y medición de irradiancia.

El resorcinol y los subproductos fueron determinados mediante espectrofotometría UV – visible en un espectrofotómetro Shimadzu UV 1601 con celdas rectangulares de cuarzo de 1 cm de paso óptico. Se leyeron los espectros de absorción desde 190 nm hasta 800 nm para todas las muestras. La concentración del analito se determinó a 272 nm, longitud de onda muy próxima a la de máxima absorbancia del resorcinol. El pH y la temperatura fueron monitoreados con un medidor de pH de membrana, marca Hanna Instruments, modelo HI 8314.

La irradiancia UV solar fue obtenida de la estación meteorológica de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, sitio donde se realizaron las pruebas experimentales.

### Caracterización de películas gruesas de TiO<sub>2</sub>.

Las películas fueron analizadas por Difracción de Rayos X en un equipo de Siemens, Diffraktometer D5000 Kristalloflex y por

espectrofotometría UV-Visible en un espectrofotómetro Shimadzu UV 1601 con el aditamento para muestras sólidas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de las películas de TiO<sub>2</sub>.

Tras efectuar el sinterizado de las películas a diferentes temperaturas, se analizó la fase cristalina por XRD. La meta fue obtener una mezcla de fases Anatasa y Rutilo. La fase anatasa es la más activa para la fotocatalisis, pero es necesaria una serie de imperfecciones en la red cristalina para reducir la tasa de recombinación hueco – electrón. Como se aprecia en la Figura 4, el incremento en la temperatura de sinterizado de las películas gruesas de TiO<sub>2</sub> por sol – gel genera una importante variación en la presencia de estas fases cristalinas. A 500° C prácticamente solo existe Anatasa, en tanto que a 605° C se tiene una mezcla de fases, con predominio de rutilo. A 650° C solamente hay Rutilo y se tiene un pico incipiente a ángulos de difracción de 19° y 20°, lo cual puede indicar descomposición del TiO<sub>2</sub> o migración de iones del vidrio a la película.

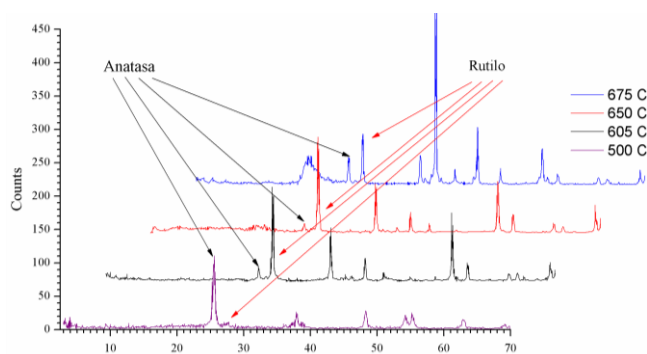


Figura 4. Efecto de la temperatura de sinterizado en la fase cristalina de la película de TiO<sub>2</sub>.

Con base en la información de Difracción de Rayos X se decidió probar las películas sinterizadas a 605° C dado que tienen una mezcla de las 2 fases cristalinas y no presenta picos de especies de descomposición del TiO<sub>2</sub> ni de migración de iones desde el vidrio (sustrato).

### Recurso solar disponible.

A través de las mediciones de Irradiancia UVA en la Estación Meteorológica de la Planta Solar, se realizó un análisis de las medidas puntuales para los días de trabajo, que fueron mayoritariamente soleados, durante los meses de noviembre y diciembre de 2011 y enero a abril de 2012. A partir de las irradiancias UVA horarias se obtuvo la dosis de energía UVA acumulada (Figura 5) y se le ajustó matemáticamente a un modelo sigmoideo tipo Dosis-Respuesta (Ecuación 3). La elección de este modelo está basada en la comparación de los valores del coeficiente de correlación r<sup>2</sup> obtenido a partir del ajuste con varios otros modelos sigmoideos. Tal como se presenta en la Tabla 2, el ajuste fue muy satisfactorio para el tipo Dosis – Respuesta.

$$E = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + 10^{(1 + \text{Log}(X_0) - t) \cdot p}} \quad (3)$$

En este modelo, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, X<sub>0</sub> y p son constantes y t es el tiempo transcurrido (en minutos).

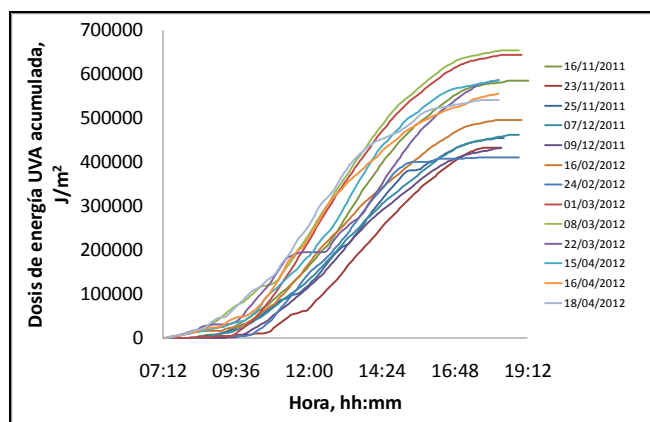


Figura 5. Energía UVA solar acumulada en los días de prueba en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM.

**Tabla 2. Ajuste de los datos experimentales de Energía UVA acumulada al modelo sigmoideo Dosis – Respuesta.**

Fecha	Coefficiente de correlación, $r^2$
23/11/2011	0.99910
16/11/2011	0.99967
25/11/2011	0.99903
09/12/2011	0.99882
30/11/2011	0.99959
07/12/2011	0.99950
16/02/2012	0.99831
24/02/2012	0.99721
01/03/2012	0.99841
08/03/2012	0.99955
22/03/2012	0.99314
15/04/2012	0.99937
16/04/2012	0.99800
18/04/2012	0.99940

Con base en los datos experimentales de irradiancia UVA provenientes de la Estación Meteorológica de la Planta solar, se determinó la energía UVA recibida a lo largo de cada prueba y se usó para establecer la cinética de oxidación fotocatalítica. En particular, el tiempo es la variable comúnmente reportada en la determinación de la velocidad de reacción y la constante cinética, esto es perfectamente válido cuando la radiación incidente en los reactores es constante con respecto al tiempo, como en las pruebas a nivel laboratorio y/o con el uso de lámparas de luz UVA. En el caso de las pruebas basadas en irradiancia solar, ésta no es constante a lo largo del día, tal como lo describe el modelo sigmoideo de la energía recibida, de suerte tal que a intervalos de tiempo fijos, la energía recibida no varía necesariamente de forma lineal. Por ello, una primera aproximación es el usar la dosis de energía recibida por el reactor, en Joules, Joules/m<sup>3</sup>, Joules /m<sup>2</sup>, etc. En este trabajo se usa la energía UVA total recibida sobre el reactor, en Joules.

#### **Oxidación fotocatalítica solar de resorcinol.**

Se realizó primero una comparación entre los espesores de las películas, variando las capas de precursor aplicadas y con el uso de una película de TiO<sub>2</sub> comercial, la del vidrio Activ™ de Pilkington (espesor de TiO<sub>2</sub>: 15 nm). El efecto de la cantidad de TiO<sub>2</sub>, como número de capas (cada capa aporta 5 µm de TiO<sub>2</sub> en promedio), es el incremento proporcional en la constante cinética de reacción de pseudo primer orden ( $k_{app}$ ) del resorcinol por fotocálisis solar heterogénea (Figura 6). Cabe esperar un incremento en la eficiencia y en la constante cinética al

incrementar el espesor de la película; sin embargo, éste será proporcional al espesor de la película sólo hasta un punto en el que el TiO<sub>2</sub> depositado sea suficiente como para absorber la totalidad de la radiación UVA incidente sin que ésta logre atravesar la película en su totalidad, con lo que una parte de la masa de TiO<sub>2</sub> no será foto – activada y será, por lo tanto, inútil y sobrada en el reactor.

Para obtener las constantes cinéticas, se considera el modelo sigmoideo de la Energía UVA solar recibida y la cinética de Langmuir – Hinshelwood. Al combinar dichas expresiones matemáticas es posible la determinación gráfica de  $k_{app}$  al graficar  $-\ln(C/C_0)$  como función de  $-\ln((E-A_1)/(A_2-E))$ , con  $A_1$  y  $A_2$  provenientes del modelo Dosis – Respuesta.

El pH afecta la tasa de reacción debido a 3 factores: el resorcinol puede des-protonarse (ceder al agua un ión hidrógeno por reacciones ácido – base), el TiO<sub>2</sub> adquiere carga positiva o negativa de acuerdo con el pH y a valores altos de pH la presencia de iones OH<sup>-</sup> es importante, lo cual favorece la formación de radicales OH· sobre el catalizador foto – activado. En este caso, se han realizado pruebas a valores de pH de 3, 7 y 10.6. A valores neutros de pH (Figura 7), la constante de reacción disminuyó ligeramente, con el mayor valor a pH ácido.

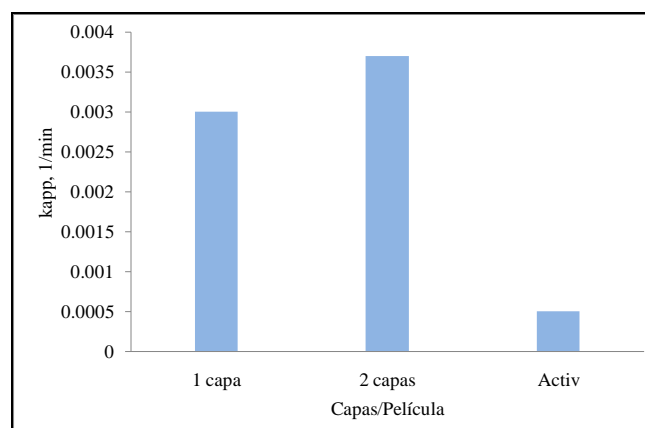


Figura 6. Efecto del grosor de la película

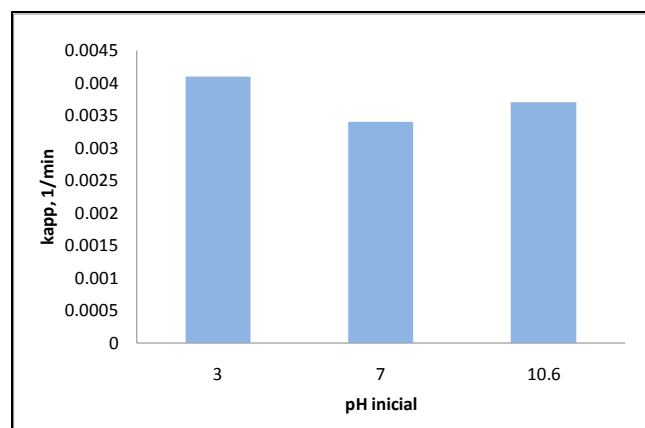


Figura 7. Efecto del pH inicial.

La remoción de este contaminante fue variada de acuerdo con las condiciones iniciales de pH, concentración, irradiancia UVA, capas de TiO<sub>2</sub> aplicadas y tiempo de sinterizado al elaborar las películas. Algunos ejemplos importantes se presentan en las figuras 8 y 9.

Es importante comentar que los reactores aquí utilizados son del tipo balsa y discontinuo. Estos reactores tienen las ventajas de una

operación muy simple y permitir la exposición del agua contaminada hasta captar la energía UVA solar suficiente para alcanzar la eficiencia deseada. Sin embargo, en el caso de formar subproductos de reacción muy volátiles, estos migrarán hacia la atmósfera.

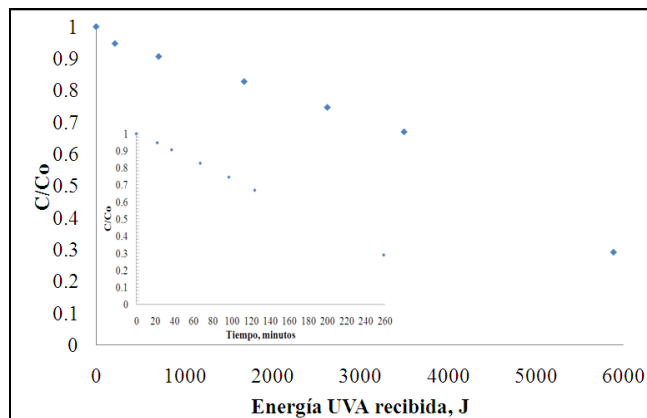


Figura 8. Remoción de resorcinol con 2 capas de TiO<sub>2</sub> bajo irradiancia solar, pH<sub>0</sub> = 7.

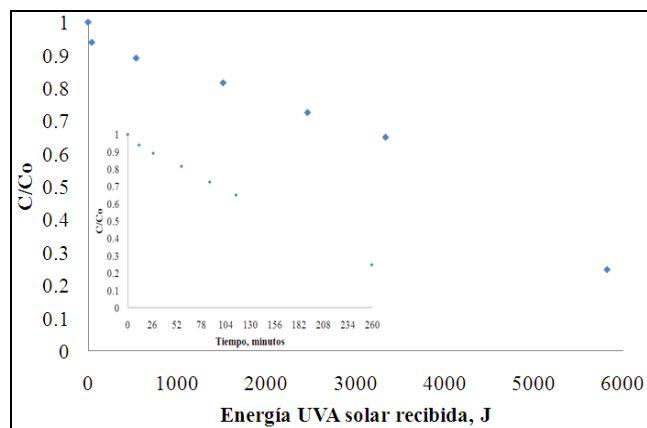


Figura 9. Remoción de resorcinol con 3 capas de TiO<sub>2</sub> bajo irradiancia solar, pH<sub>0</sub> = 7

## CONCLUSIONES

1. Con los resultados de estas pruebas solares de oxidación fotocatalítica solar se demuestra que es posible utilizar las películas gruesas preparadas por nuestro método sol – gel para remover eficientemente el resorcinol del agua a través de reactores abiertos a la atmósfera
2. El pH inicial debe ser optimado para lograr una oxidación fotocatalítica del resorcinol más rápida.
3. A mayor número de capas de TiO<sub>2</sub> aplicadas, más rápida deberá resultar la fotocatalisis heterogénea, hasta un punto donde el espesor de la película sea tan grueso que impida el paso de radiación a todas las regiones de la película.
4. Debe optimarse la temperatura de sinterizado para lograr tener una relación de fases anatasa a rutilo inclinada hacia la anatasa, lo cual ha sido reportado (Herrmann, 2005) como la forma de lograr la actividad fotocatalítica mayor de este semiconductor.
5. El ajuste de la radiación UVA a un modelo Dosis – respuesta permite el incorporar los datos de mediciones en el cálculo de la constante cinética ( $k_{app}$ ) real de sistemas expuestos a irradiancia solar; si  $k_{app}$  se obtiene de la forma tradicional al graficar  $-\ln(C/C_0)$  vs  $t$ , se considera que el

aporte de energía al sistema es constante con respecto al tiempo, cosa que no sucede en los reactores solares.

## REFERENCIAS

- Coleman, H. M.; Chiang, K. y Amal, R. (2005). Effects of Ag and Pt on photocatalytic degradation of endocrine disrupting chemicals in water. *Chemical Engineering Journal* 113, 65–72, Elsevier.
- Gibson, R.; Becerril-Bravo, E.; Silva-Castro, V. y Jiménez, B. (2007). Determination of acidic pharmaceuticals and potential endocrine disrupting compounds in wastewaters and spring waters by selective elution and analysis by gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1169, 31–39, Elsevier.
- Herrmann, J. M. (2005). Heterogeneous photocatalysis: state of the art and present applications, *Topics in Catalysis*, 34., 1-4, Springer Science, pp. 49 – 65.
- Houas, A.; Lachheb, H.; Ksibi, M.; Elaloui, E.; Guillard, Ch. y Herrmann, J. (2001). Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water. *Applied catalysis B: environmental*. 81, Elsevier
- Jiménez, Blanca (2001). La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. 2ª edición, Limusa, México.
- Lynch, B. S.; Delzell, E. y Bechtel, D. (2002) Toxicology Review and Risk Assessment of Resorcinol: Thyroid Effects. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 36, 198–210, Elsevier.
- Novotna, P.; Krysa, J.; Maixner, J.; Kluson, P. y Novak, P. (2010). Photocatalytic activity of sol–gel TiO<sub>2</sub> thin films deposited on soda lime glass and soda lime glass precoated with a SiO<sub>2</sub> layer. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204. Elsevier, 2570–2575.
- Pardeshi, S. K. y Patil, A. B. (2009). Solar photocatalytic degradation of resorcinol a model endocrine disrupter in water using zinc oxide. *Journal of Hazardous Materials* 163, 403–409, Elsevier.
- SEMARNAT (2011). Estadísticas del agua en México. Edición 2011, CONAGUA, México.
- WHO (2006). Concise International Chemical Assessment Document 71. Resorcinol.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la UNAM, a través de la DGAPA, por aportar los fondos para realizar este trabajo, mediante proyecto PAPIIT.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, al laboratorio de Difracción de Rayos X de FES Cuautitlán, UNAM; a Lourdes Angélica Quiñones por las mediciones de irradiancia de la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM; y a todas aquellas personas que colaboraron para el desarrollo de este trabajo... ¡gracias!