

# Degradación y mineralización de un colorante en aguas residuales, analizado desde las superficies de respuesta\*

Luis Fernando Garcés Giraldo\*\*

## Resumen

**Introducción.** El sector textil es considerado de alto impacto ambiental; los colorantes textiles tienen alta persistencia en el ambiente y los métodos de eliminación clásicos no son útiles, debido a que oxidaciones o reducciones parciales pueden generar productos secundarios altamente tóxicos. La fotodegradación sensibilizada, con  $\text{TiO}_2$  ó  $\text{FeCl}_3$ , es una técnica que puede ser empleada como sistema de depuración por sí misma, o como un proceso terciario, en especial para tratar residuos industriales. **Objetivo.** Evaluar la interacción del  $\text{FeCl}_3$  y el  $\text{TiO}_2$  con  $\text{H}_2\text{O}_2$  de residuos líquidos textiles por medio de luz artificial a través de superficies de respuesta. **Materiales y métodos.** Se utilizó una lámpara de luz ultravioleta de marca MIGHTY PURE de 60 Hz, con una cubeta de vidrio de longitudes 41 cm x 25,5 cm x 20 cm que almacena 15 L de muestra; este sistema es complementado con una bomba que maneja un flujo de 0,047 L/s. **Resultados.** Se obtuvo una degradación del 100% y un porcentaje de mineralización de 70.1; esto con el ensayo donde se utilizó una dosificación de 60 mg/L  $\text{FeCl}_3$  y 1.0 mL/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . **Conclusión.** El agua coloreada degrada y mineraliza más rápidamente con el  $\text{FeCl}_3$  que con el  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

**Palabras claves:** tratamiento de aguas residuales, colorantes textiles, Amarillo Novactive F4GL, degradación, mineralización.

## Degradation and mineralization of a dye contained in waste water, analyzing the response surfaces

### Abstract

**Introduction.** Textiles sector has a special place among tyhose that have a high environmental impact. Textile dyes are very persistent in the environment and the classic elimination methods are not useful in this case given the fact that partial oxidations or reductions can generate very toxic secondary products. Sensitized photo degradation with  $\text{TiO}_2$  or  $\text{FeCl}_3$ , is technique that can be used as a depuration system or as a tertiary process, specially in industrial waste's treatment. **Objective.** To evaluate the interaction of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{FeCl}_3$  with  $\text{H}_2\text{O}_2$  from textile liquid wastes by the use of artificial light through response surfaces. **Materials and methods.** A 60 Hz MIGHTY PURE ultra-violet light lamp was used with a 41 cm x 25,5 cm x 20 glass bowl with 15 L of sample. This system is supplemented with a pump that produces a 0,047 L/s flow. **Results.** A 100% degradation was obtained, and so a 70.1% mineralization percentage in the test in which a 60 mg/L  $\text{FeCl}_3$  and 1.0 mL/L of  $\text{H}_2\text{O}_2$  dose was used. **Conclusion.**  $\text{FeCl}_3$  ddegrades and mineralizes water faster than  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

**Key words:** waste water treatment, textile dyes, Yellow Novactive F4GL, degradation, mineralization.

\* Derivado del proyecto de investigación: "FeCl<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> interaction with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the liquid waste treatment from the textile industry using artificial light trough factorial model", para optar al título de doctor of Science in Environmental Engineering. Financiado por el Fondo para el Desarrollo de la Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista.

\*\* Director de Investigación. Grupo de Investigación GAMA. Corporación Universitaria Lasallista

Correspondencia: Luis Fernando Garcés Giraldo. e-mail: lugarces@lasallista.edu.co

Artículo recibido: 05/20/2010; Artículo aprobado: 3/12/2010

## Degradação e mineralização de um corante em águas residuais, analisado desde as superfícies de resposta

### Resumo

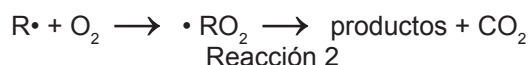
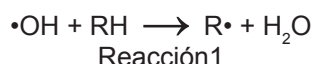
**Introdução.** O setor têxtil é considerado de alto impacto ambiental; os corantes têxteis têm alta persistência no ambiente e os métodos de eliminação clássicos não são úteis, devido a que oxidações ou reduções parciais podem gerar produtos secundários altamente tóxicos. A fotodegradação sensibilizada, com TiO<sub>2</sub> ou FeCl<sub>3</sub>, é uma técnica que pode ser empregada como sistema de depuração por si mesma, ou como um processo terciário, em especial para tratar resíduos industriais. **Objetivo.** Avaliar a interação do FeCl<sub>3</sub> e o TiO<sub>2</sub> com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de resíduos líquidos têxteis

por meio de luz artificial através de superfícies de resposta. **Materiais e métodos.** Utilizou-se um lustre de luz ultravioleta de marca MIGHTY PURE de 60 Hz, com uma cuba de vidro de longitudes 41 cm x 25,5 cm x 20 cm que armazena 15 Litros de mostra; este sistema é complementado com uma bomba que maneja um fluxo de 0,047 L-/s. **Resultados.** Obteve-se uma degradação de 100% e uma porcentagem de mineralização de 70.1; isto com o ensaio onde se utilizou uma dosificação de 60 mg/L FeCl<sub>3</sub> e 1.0 ML/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. **Conclusão.** O água colorida degrada e mineralização mais rapidamente com o FeCl<sub>3</sub> que com o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**Palavras importantes:** tratamento de águas residuais, corantes têxteis, Amarelo Novactive F4GL, degradação, mineração.

## Introducción

La oxidación avanzada se define como aquellos procesos en los cuales existe formación de radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) altamente reactivos, ya que presentan un elevado potencial de oxidación ( $E^\circ=2.8\text{V}$ ), característica que los hace de gran efectividad para la oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno. Es decir, se generan radicales orgánicos libres (reacción 1), los que pueden reaccionar con oxígeno molecular para formar peroxirradicales (reacción 2). Incluso, pueden iniciarse reacciones de oxidación en serie que pueden conducir a la mineralización completa de los compuestos orgánicos<sup>1-12</sup>.



En estos procesos se generan radicales hidroxilo, y en algunos casos no son la única especie oxidante implicada en el proceso. Sin embargo, en la mayoría de procesos de oxidación avanzada, a partir de diferentes combinaciones de ozono, peróxido de hidrógeno, radiaciones UV y dióxido de titanio, o mediante el reactivo Fenton ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ), se producen radicales hidroxilo<sup>8-13</sup>.

Las principales ventajas de los procesos de oxidación avanzada son<sup>2,11-18</sup>:

- Capacidad potencial para llevar a cabo una profunda mineralización de los contaminantes orgánicos y oxidación de los compuestos inorgánicos hasta dióxido de carbono y iones (cloruros, nitratos...).
- Reactividad con la mayoría de compuestos orgánicos, hecho principalmente interesante si se quiere evitar la presencia de subproductos potencialmente tóxicos presentes en los contaminantes originales, que pueden crearse mediante otros métodos.
- Descomposición de los reactivos utilizados como oxidantes en productos inocuos.

Los procesos de oxidación avanzada son muy útiles en el tratamiento de aguas residuales como pretratamiento antes de un tratamiento biológico, en el caso de contaminantes recalcitrantes a la biodegradación, o se pueden utilizar como postratamiento para mejorar las características de las aguas antes de ser vertidas a las fuentes de aguas receptoras.

Existen numerosos procesos utilizados en la actualidad para la degradación de sustancias presentes en el agua. Algunos de ellos son los recientemente aplicados procesos de oxidación avanzada, los cuales se constituirán, en un futuro próximo, en uno de los recursos tecnológicos más utilizados para el tratamiento de aguas contaminadas con productos orgánicos recalcitrantes industriales. Estos procesos im-

plican la formación de radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), altamente reactivos, que actúan como iniciadores de la oxidación. Entre estos procesos, los de mayor auge son la fotólisis y la fotocatalisis. La fotodegradación sensibilizada se ha usado para degradar y/o mineralizar una variedad de compuestos orgánicos; algunos de ellos son de gran uso industrial o agrícola<sup>19-26</sup>.

La investigación en tecnologías como la oxidación fotocatalítica, alternativa a procesos de oxidación tradicionales (ozono, peróxido de hidrógeno e hipoclorito), está plenamente justificada para estos fines. Los sistemas de oxidación avanzada, en los que se combina la energía radiante ultravioleta y un oxidante, como aire, en presencia de semiconductores estables, como el dióxido de titanio o el reactivo fenton, se presentan como una alternativa sencilla y económica para la mineralización completa de compuestos orgánicos, para la adecuación de efluentes industriales a su vertido y posterior tratamiento de redes de saneamiento<sup>19-26</sup>.

## Materiales y métodos

La investigación consistió en encontrar las condiciones óptimas para el tratamiento de aguas residuales con colorantes utilizados en la in-

dustria textil como lo es el amarillo novactive F4GL, por procesos de oxidación avanzada. Para el montaje de los ensayos se utilizó una lámpara de luz ultravioleta de marca MIGHTY PURE de 60 Hz, con una cubeta de vidrio de longitudes 41 cm x 25,5 cm x 20 cm que almacena 15 L de muestra; este sistema lo complementa una bomba que maneja un flujo de 0,047 L/s.

Este sistema permitió aprovechar la energía de la luz artificial para, sin ninguna etapa intermedia, provocar una serie de reacciones químicas que den lugar a la mineralización o eliminación de los contaminantes disueltos en las aguas objeto de estudio.

El colorante en estudio es utilizado en la industria textil para el teñido de prendas. La concentración promedio en el agua fue de 300 mg/L, que es la concentración promedio típica de los efluentes industriales textiles que contienen este colorante. En la tabla 1 se presentan los ensayos que se llevaron a cabo; cada uno de ellos se hizo por triplicado para disminuir el error experimental. En los experimentos se utilizó el peróxido de hidrógeno como agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). La duración de los ensayos fue de dos horas.

Tabla 1. Condiciones de los experimentos

Experimento	TiO <sub>2</sub> (mg/L) ó FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL/L)
E1	0	0
E2	30	0
E3	30	0.5
E4	30	1.0
E5	60	0
E6	60	0.5
E7	60	1.0
E8	0	0.5
E9	0	1.0

Se utilizó la metodología de la pendiente ascendente para optimizar las variables respuesta, la cual es una técnica de optimización que tiene como objetivo encontrar el y/o los pun-

tos que maximizan o minimizan la ecuación de superficie de respuesta. Este proceso permite recorrer secuencialmente la trayectoria de la máxima o la mínima pendiente que conduce a

la dirección del máximo o del mínimo aumento de la respuesta.

## Resultados

### Cinética de degradación y mineralización Con el $\text{FeCl}_3$

Para determinar si el orden de la reacción es uno, se representó gráficamente el logaritmo de la concentración residual del colorante contra el tiempo acumulado, para el porcentaje de degradación y porcentaje de mineralización (Figura 1). Las reacciones fueron de primer orden (mayor valor en el coeficiente de correlación). La reacción de primer orden dependería de la constante de degradación del colorante. Los tiempos de vida media y las velocidades de reacción fueron calculados de acuerdo con

los planteamientos realizados en la ecuación de orden de reacción 1.

La figura 2 presenta el resumen del logaritmo de la concentración de degradación y logaritmo de la concentración de mineralización del colorante con  $\text{FeCl}_3$ . En esta figura se puede observar cómo el ensayo 7 es el que presenta mayor pendiente en las líneas rectas.

El orden de la reacción, la constante de velocidad y el tiempo de vida media para cada uno de los ensayos realizados en el porcentaje de degradación y porcentaje de mineralización del amarillo con  $\text{FeCl}_3$  se observan en la tabla 2. Según la constante de velocidad, la reacción de degradación y mineralización del amarillo con  $\text{FeCl}_3$  más rápida fue con el ensayo 7 (E7), con un tiempo de vida medio de 28.76 y 69.30 minutos, respectivamente.

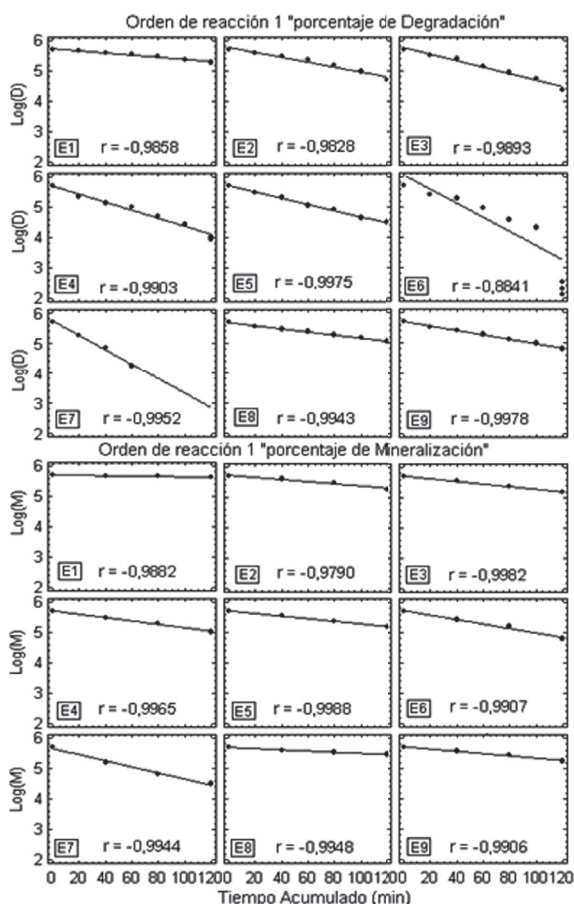


Figura 1. Gráficas de reacción orden 1, para el porcentaje de degradación y porcentaje de mineralización del colorante con  $\text{FeCl}_3$

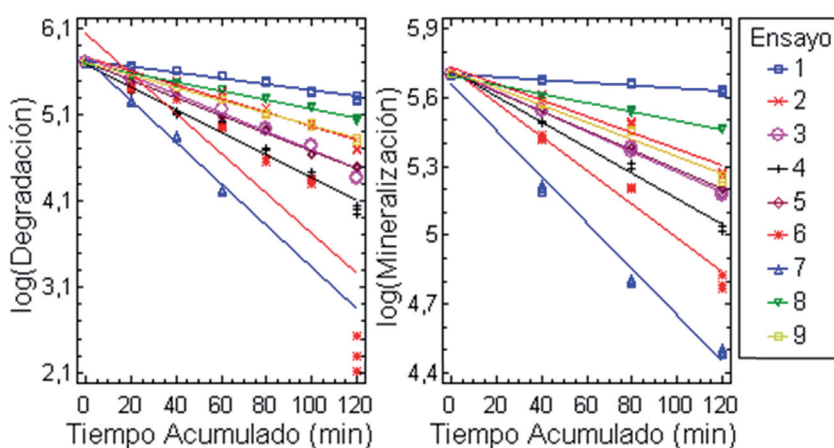


Figura 2. Resumen de gráficas de reacción orden 1, para la concentración de degradación y porcentaje de mineralización del colorante con  $\text{FeCl}_3$ .

Tabla 2. Orden de reacción, constante de velocidad y tiempo de vida media para el porcentaje de mineralización y porcentaje de degradación del colorante con  $\text{FeCl}_3$

	Ensayo	Orden de la reacción	Constante de velocidad ( $\text{min}^{-1}$ )	Correlación	Tiempo de vida media (min)
Degradación (%)	E1	1	0,0035	-0,9858	198,00
	E2	1	0,0080	-0,9828	86,63
	E3	1	0,0107	-0,9893	64,77
	E4	1	0,0132	-0,9903	52,50
	E5	1	0,0101	-0,9975	68,61
	E6	1	0,0232	-0,8841	29,87
	E7	1	0,0241	-0,9952	28,76
	E8	1	0,0051	-0,9943	135,88
	E9	1	0,0073	-0,9978	94,93
Mineralización (%)	E1	1	0,0006	-0,9882	1155,0
	E2	1	0,0035	-0,9790	198,00
	E3	1	0,0043	-0,9982	161,16
	E4	1	0,0055	-0,9965	126,00
	E5	1	0,0042	-0,9988	165,00
	E6	1	0,0073	-0,9907	94,93
	E7	1	0,0100	-0,9944	69,30
	E8	1	0,0019	-0,9948	364,74
	E9	1	0,0037	-0,9906	187,30

### Diseño factorial 3<sup>3</sup> para optimizar las variables respuesta con FeCl<sub>3</sub>

Con la metodología de la pendiente ascendente se obtuvieron los valores de los factores que optimizan la variable respuesta en cada porcentaje desde 50 hasta 100%. La combinación de FeCl<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo que genera el máximo de porcentaje de degradación y de mineraliza-

ción se presenta en la tabla 3. La superficie de repuestas para las variables dependientes estudiadas se muestra en la figura 3.

El máximo porcentaje de degradación no es estable; el FeCl<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo, respecto al porcentaje de mineralización permanece constante en las variables FeCl<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo desde 80% (Tabla 3).

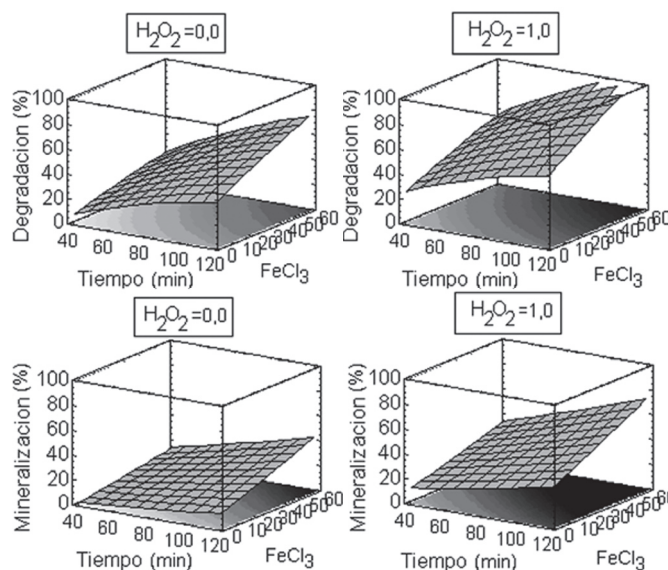


Figura 3. Superficies de respuesta que relacionan FeCl<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo

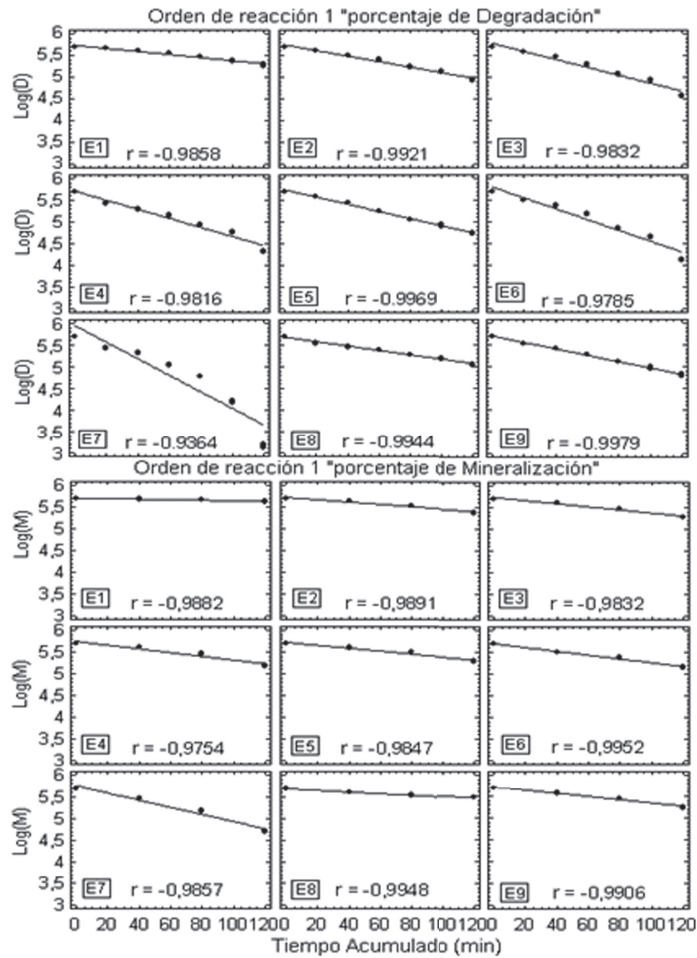
Tabla 3. Combinación de FeCl<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo

Variables	Mínimo	Máximo	Degradación (%)					
			50	60	70	80	90	100
Tiempo	40,0	120,0	75	88	101	112	120	111
TiO <sub>2</sub>	0,0	60,0	28	33	37	43	49	58
FeCl <sub>3</sub>	0,0	1,0	0.51	0.53	0.58	0.67	0.70	0.92
Variables	Mínimo	Máximo	Mineralización (%)					
			50	60	70	80	90	100
Tiempo	40,0	120,0	98	107	117	120	120	120
FeCl <sub>3</sub>	0,0	60,0	52	60	60	60	60	60
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,0	1,0	0.64	0.74	0.97	1	1	1

**Cinética de degradación y mineralización con el TiO<sub>2</sub>**

Para determinar si el orden de la reacción es uno, se representó gráficamente el logaritmo de la concentración residual del colorante contra el tiempo acumulado, para la concentración de degradación y porcentaje de mineralización

(Figura 4). Las reacciones fueron de primer orden (mayor valor en el coeficiente de correlación). La reacción de primer orden dependería de la constante de degradación del colorante. Los tiempos de vida media y las velocidades de reacción fueron calculados de acuerdo con los planteamientos realizados en la ecuación de orden de reacción 1.

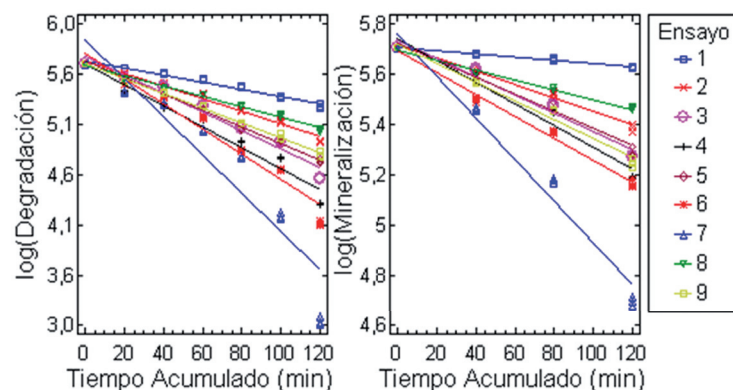


**Figura 4. Gráficas de reacción orden 1, para la concentración de degradación y porcentaje de mineralización del colorante**

La figura 5 presenta el resumen del logaritmo de la concentración de degradación y logaritmo de la concentración de mineralización del amarillo con TiO<sub>2</sub>. En esta figura se puede observar cómo el ensayo 7 (E7) es el que presenta mayor pendiente en las líneas rectas.

El orden de la reacción, la constante de velocidad y el tiempo de vida media para cada uno

de los ensayos realizados en la concentración de degradación y de mineralización del colorante con TiO<sub>2</sub> se observan en la tabla 4. Según la constante de velocidad, la reacción de la concentración de degradación y la concentración de mineralización del amarillo novactive F4GL con TiO<sub>2</sub> más rápida fue con el ensayo 7, con un tiempo de vida medio de 36.47 y 84.51 minutos, respectivamente.



**Figura 5. Resumen de gráficas de reacción orden 1, para la degradación y mineralización del colorante con  $\text{TiO}_2$**

**Tabla 4. Orden de reacción, constante de velocidad y tiempo de vida media para la degradación y mineralización del colorante con  $\text{TiO}_2$**

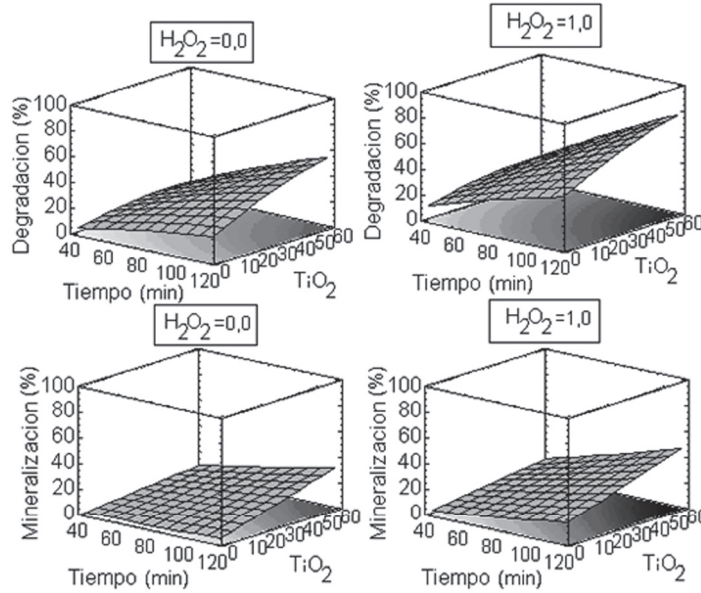
	Ensayo	Orden de la reacción	Constante de velocidad ( $\text{min}^{-1}$ )	Correlación	Tiempo de vida media (min)
Degradación (%)	E1	1	0,0073	-0,9979	94,93
	E2	1	0,0035	-0,9858	198,00
	E3	1	0,0063	-0,9921	110,00
	E4	1	0,0091	-0,9832	76,15
	E5	1	0,0104	-0,9816	66,63
	E6	1	0,0082	-0,9969	84,51
	E7	1	0,0190	-0,9785	36,47
	E8	1	0,0124	-0,9364	55,89
	E9	1	0,0051	-0,9944	135,88
Mineralización (%)	E1	1	0,0006	-0,9882	1155,0
	E2	1	0,0026	-0,9891	266,54
	E3	1	0,0035	-0,9832	198,00
	E4	1	0,0042	-0,9754	165,00
	E5	1	0,0033	-0,9847	210,00
	E6	1	0,0043	-0,9952	161,16
	E7	1	0,0082	-0,9857	84,51
	E8	1	0,0019	-0,9948	364,74
	E9	1	0,0037	-0,9906	187,30

**Diseño factorial 3<sup>3</sup> para optimizar los variables respuesta con TiO<sub>2</sub>**

Con la metodología de la pendiente ascendente se obtuvieron los valores de los factores que optimizan la variable respuesta en cada porcentaje desde 50 hasta 100%. La combinación de TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el tiempo que genera el máximo del porcentaje de degradación y de mineraliza-

ción se presentan en la tabla 5. La superficie de repuestas para las variables dependientes estudiadas se presenta en la figura 6.

El máximo porcentaje de degradación se estabiliza en TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el tiempo después de 70%; respecto al porcentaje de mineralización, éste permanece constante en las variables TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo constante, desde 50%.



**Figura 6. Superficies de respuesta que relacionan TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo del colorante**

**Tabla 5. Combinación de TiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo**

Variables	Mínimo	Máximo	Degradación (%)					
			50	60	70	80	90	100
Tiempo	40,0	120,0	78	113	120	120	120	120
TiO <sub>2</sub>	0,0	60,0	60	43	52	60	60	60
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,0	1,0	0.98	0.63	0.76	1	1	1
Variables	Mínimo	Máximo	Mineralización (%)					
			50	60	70	80	90	100
Tiempo	40,0	120,0	120	120	120	120	120	120
TiO <sub>2</sub>	0,0	60,0	60	60	60	60	60	60
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,0	1,0	1	1	1	1	1	1

## Conclusiones

A medida que se prolonga el tiempo de exposición e irradiación del colorante, se incrementa el porcentaje de remoción del mismo, debido al intervalo de tiempo en el cual se desarrollan las reacciones de oxidación y reducción de compuestos en los procesos de oxidación avanzada. Comparando la fotocatalisis para el colorante amarillo novactive F4GL ( $\text{FeCl}_3$  y  $\text{TiO}_2$ ), se concluye que el colorante degrada y mineraliza más rápidamente con el  $\text{FeCl}_3$ ; esto sucedió en el ensayo E7 (60 mg/L  $\text{FeCl}_3$  y 1.0 mL/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), donde se obtuvo un porcentaje de degradación del 100% y un porcentaje de mineralización del 70.1%. En este mismo experimento se obtuvieron los mejores resultados para la degradación y mineralización del colorante con el  $\text{TiO}_2$ .

## Referencias bibliográficas

1. PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio. Fotólisis y fotodegradación sensibilizada con  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{TiO}_2$  de pesticidas en aguas naturales. Tesis doctoral Química Analítica del Medio Ambiente y de la Polución. Barcelona: Universidad de Barcelona. Departamento de Química analítica, 1998. 149 p.
2. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. Fotocatálisis con  $\text{TiO}_2$  de los colorantes azul de metileno y naranja reactivo 84 utilizando colector solar. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de ingenierías. Ingeniería Ambiental, 2003. 220 p.
3. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando; et al. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: Revista Lasallista de Investigación. Corporación Univeritaria Lasallista. Junio 2004. Vol. 1, no. 1, p. 83-92.
4. BUMPUS, Jhon A.; et al. Remediation of water contaminated with an azo dye: an undergraduate laboratory experiment utilizing an inexpensive photocatalytic reactor. En: Journal of Chemistry Education. December 1999. Vol. 76, no. 12, p. 1680.
5. PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio. Destoxicación solar de aguas mediante Fotocatálisis o fotosensibilización. En: Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Diciembre 1999. No. 19, p. 24-28.
6. LAZLO, Joseph. Regeneration of azo-dye. Saturated sellulosic anion exchange resin by burkholdeara cepacia anaerobic dye reduction. En: Environmental science & technology. Enero 2000. No. 3, p. 167-172.
7. LI, X. Z. and LI, F. B. Study of  $\text{Au}/\text{Au}^{3+}\text{-TiO}_2$  photocatalysis toward visible Photooxidation for water and wastewater treatment. En: Environmental science & technology. 2001. Vol. 35, no. 11, p. 2381-2387.
8. BEKBOLET, Miray and BALCIOGLU, Isil. Photocatalytic degradation kinetics of humic acid in aqueous  $\text{TiO}_2$  dispersions: the influence of hydrogen peroxide and bicarbonate ion. En: Water Science & Technology. 1996. Vol. 34, no. 9, p. 73-80.
9. FRANCO, Alexander; et al. Fotocatálisis de  $\text{Hg}^{2+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$  en aguas residuales. En: Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Diciembre 2001. Vol. 24, p. 7-13.
10. MALATO-RODRÍGUEZ, Sixto; et al. Low concentrating CPC collectors for photocatalytic water detoxification: comparison with a medium concentrating solar collector. En: Water Science & Technology. 1997. Vol. 35, no. 4, p 157-164.
11. LI, X. Z. and Zhao, G. Advanced treatment of dyeing wastewater for reuse. En: Water Science & Technology. 1999. Vol. 39, no. 10-11, p. 249-255.
12. HALMANN, Martin M. Photodegradation of water pollutants. New York: CRC Press, 2000. 301 p.
13. PERALTA ZAMORA, Patricio; et al. Degradation of reactive dyes I. A comparative study of ozonation enzymatic and photochemical processes. En: Chemosphere. 1999. Vol. 38, no. 4, p 835-852.
14. ZHAO, Wei; et al. Photodegradation of Sulforhodanine-B dye in platinized titania dispersions under visible light irradiation: Influence of Platinum as a functional co-catalyst. En: The Journal of physical chemistry. Mayo 2002. Vol. 16. no. 16, p. 5022-5028.
15. GULYAS, Holger; et al. Experiences with solar application of photocatalytic oxidation for dye removal from a model textile industry wastewater. En: Water Pollution VI. Modelling, Measuring and Prediction. United Kingdom: Editorial C.A. Brebbia, 2001. p 153-165.
16. PÉREZ-ESTRADA, Leónidas A.; et al. Degradación de desechos de laboratorio mediante fotocatalisis solar. México D.F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2001. 6 p.
17. NI, Meng; et al. A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using  $\text{TiO}_2$  for hydrogen production. En: Renewable and sustainable Energy Reviews. Abril 2007. Vol. 11, no. 3, p.401-425.

18. MANSILLA, Hector D.; et al. Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil. En: CYTED VII-G. Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea. La Plata, Argentina: CYTED VII-G, 2001. p. 60-84.
19. TELLO RENDON, Erick Danilo. Optimización de tecnologías fotocatalíticas de oxidación avanzada aplicadas al tratamiento de residuos líquidos de laboratorio. Tesis doctoral. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2000. 333 p.
20. GALINDO, Catherine; JACQUES, Patrice and KALT, André. Photodegradation of the aminoazobenzene acid orange 52 by three advanced oxidation processes: UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/TiO<sub>2</sub>, and VIS/TiO<sub>2</sub>. Comparative mechanistic and kinetic investigations. En: Journal of Photochemistry and Photobiology. January 2000. Vol. 130, no.1, p. 35-47.
21. POZZO, Roberto L.; et al. Radiation extinction of slurried TiO<sub>2</sub> as a function of mechanical action and ionic composition of the suspending media: a key factor in the photocatalytic efficiency. En: Applied Catalysis B: Environmental. July 2002. Vol. 38, no. 1, p: 61-69.
22. GRZECHULSKA, Joanna and WALDEMAR MORAWSKI, Antoni. Photocatalytic decomposition of azo-dye acid black 1 in water over modified titanium dioxide. En: Applied Catalysis B: Environmental. February 2002. Vol. 36, no. 1, p. 45-51.
23. STOCK, Naomi L. ; et al. Combinative sonolysis and photocatalysis for textile dye degradation. En: Environmental Science and Technology. 2000. Vol. 34, no. 9, p. 1747-1750.
24. GULYAS, Holger; et al. Experiences with solar application of photocatalytic oxidation for dye removal from a model textile industry wastewater. En: WATER POLLUTION. (6 : 2001 : Southampton). Water pollution VI. Modelling, Measuring and Prediction. Southampton : Hrsg; Brebbia; WIT Press, 2001. p. 153-165.
25. INCE, N. H. and TEZCANLI, G. Treatability of textile dye-bath effluents by advanced oxidation: preparation for reuse. En: Water Science and Technology. 1999. Vol. 40, no. 1, p.183-190.
26. BUMPUS, Jhon; et al. Remediation of water contaminated with an azo dye: an undergraduate laboratory experiment utilizing an inexpensive photocatalytic reactor. En: Journal of Chemistry Education. December 1999. Vol. 76, no. 12, p. 1680-1683.