



Interacción del FeCl_3 y el TiO_2 con H_2O_2 en el tratamiento de residuos líquidos con Amarillo Novactive F4GL analizado mediante un modelo factorial*

Luis Fernando Garcés Giraldo¹ / Alvaro Arango Ruíz²

Línea de investigación: Tratamiento de aguas. Grupo de investigación GAMA

Interaction of FeCl_3 and TiO_2 with H_2O_2 in the treatment of liquid wastes with Yellow Novactive F4GL analyzed by the use of a factorial model

Interação do FeCl_3 e o TiO_2 com H_2O_2 no tratamento de resíduos líquidos com Amarelo Novactive F4GL analisado mediante um modelo fatorial

RESUMEN

Introducción. Los colorantes textiles tienen gran 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.

* Investigación financiada con el apoyo del Fondo de Investigaciones de la Corporación Universitaria Lasallista

¹ Ingeniero Sanitario. Magíster en Ingeniería Ambiental. Especialista en Ingeniería Ambiental. Investigador grupo GAMA. Decano Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista. ² Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana. Docente-Coordenador del Programa de Ingeniería Ambiental. Director del grupo GAMA. Corporación Universitaria Lasallista.

Correspondencia: Luis Fernando Garcés Giraldo, email: lugarces@lasallista.edu.co

Fecha de recibo: 18/08/2009; fecha de aprobación: 22/10/2009

Objetivo. Estudiar la degradación y mineralización del colorante Amarillo Novactive F4GL con TiO_2 y FeCl_3 , utilizando los procesos de oxidación avanzada con una lámpara de luz ultravioleta y analizándolas mediante un modelo factorial.

Materiales y métodos. En 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 almacenaba 15 L de muestra. Este sistema fue complementado con una bomba que manejaba un flujo de 0,047 L/s. Cada ensayo se realizó por triplicado para disminuir el error experimental.

Resultados. El ensayo donde se obtuvieron los porcentajes de degradación y mineralización más altos fue con 60 mg/L FeCl_3 y 1.0 mL/L de H_2O_2 . Correspondió a un porcentaje de degradación de 100 y a un porcentaje de mineralización de 70.1.

Conclusión. El agua residual con el colorante degrada y mineraliza más rápidamente con el FeCl_3 que con el TiO_2 .

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales, colorantes textiles, Amarillo Novactive F4GL, degradación, mineralización.

ABSTRACT

Introduction. Textile dyes have a great persistence in the environment and classic methods to eliminate them are useless due to the fact that oxidations or partial reductions can generate secondary products with high toxicity levels.

Objective. To study the degradation and the mineralization of the Yellow Novactive F4GL dye with TiO_2 and FeCl_3 , using the advanced oxidation processes with a ultra-violet light lamp and analyzing both the degradation and the mineralization by the use of a factorial model.

Materials and methods. To make the tests a MIGHTY PURE 60 Hz ultra -violet light lamp was used, with a glass bowl which measured 41 cm x 25,5 cm x 20 cm and contained 15 L of sample. This system was complemented by a pump that had a 0,047 L/s flow. Each test was made three times, in order to reduce the experimental error.

Results. The test with the highest degradation and mineralization levels was that with 60 mg/L FeCl_3 and 1.0 mL/L of H_2O_2 . It had a degradation percentage of 100 and a mineralization percentage of 70.1.

Conclusion. Waste water with this dye is degraded and mineralized more rapidly with FeCl_3 than with TiO_2 .

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

RESUMO

Introdução. Os corantes têxteis têm grande 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.

Objetivo. Estudar a degradação e mineração do corante Amarelo Novactive F4GL com TiO_2 e FeCl_3 utilizando os processos de oxidação avançada com um lustre de luz ultravioleta e analisada mediante um modelo factorial.

Materiais e métodos. Na montagem dos ensaios se utilizou 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 L de mostra; este sistema o complementa uma bomba que maneja um fluxo de 0,047 L/s. Cada ensaio se realizou por triplicado para diminuir o erro experimental.

Resultados. O ensaio onde se obtiveram as percentagens de degradação e mineração mais altos foi com 60 mg/L FeCl_3 e 1.0 ML/L de H_2O_2 , correspondeu a uma porcentagem de degradação de 100 e uma porcentagem de mineração de 70.1.

Conclusão. A água residual com o corante degrada e minera mais rapidamente com o FeCl_3 , que com o TiO_2 .

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

INTRODUCCIÓN

El sector textil forma parte de una cadena productiva altamente compleja, que incluye la producción agrícola, la comercialización de fibras naturales y de fibras sintéticas, la industria textil, la confección y la comercialización. Como puede verse, son etapas de una actividad fuertemente eslabonada¹⁻⁴.

En Colombia existen dos polos de desarrollo textil: Medellín, donde se ubican las grandes industrias pertenecientes a sociedades anónimas, y Bogotá D.C., en la que se encuentran empresas que en su mayoría son sociedades limitadas, de carácter familiar e intensivas en el uso de fibras sintéticas y en tejido de punto^{1-2,4}.

La industria manufacturera colombiana produce anualmente alrededor de 750.000 m² de productos textiles. La fabricación de los diferentes productos de esta industria se lleva a cabo a partir de procesos como limpiado, lanzado, estirado, acabado y teñido, entre otros. Debido a estos procesos la industria textil genera agua residual, que contiene fenoles, sulfuros, cromo y colorantes. Estos últimos son contaminantes que llaman la atención, debido al color y a que algunos son de difícil degradación^{1,4,5}.

El sector textil es considerado de alto impacto ambiental y, de acuerdo a la clasificación creada por CINSET, se puede catalogar como de “Alta Significación Ambiental” –ASA-. Este impacto es más negativo en los efluentes líquidos⁶.

Los colorantes textiles tienen gran 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. Muchos de los colorantes no son directamente tóxicos para los organismos vivos. Sin

embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cursos de agua, por lo que su presencia debe ser controlada⁷.

Las moléculas de los colorantes empleados en la industria textil son de estructura muy variada y compleja. Todos ellos están diseñados para resistir las degradaciones producidas por diferentes agentes externos. La gran mayoría son muy solubles en agua, resistentes a la acción de productos químicos y poco biodegradables⁸⁻¹⁰.

Lo anterior ha llevado a la búsqueda de métodos eficientes para eliminar compuestos químicos contaminantes generados por diferentes actividades humanas. La contaminación del agua reviste gran importancia, pues los contaminantes pueden acumularse y ser transportados en arroyos, ríos, lagos, presas y depósitos subterráneos, afectando la vida silvestre y la salud del hombre.

Las fuentes más importantes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas son las aguas residuales domésticas e industriales. Las tecnologías fotocatalíticas son consideradas muy prometedoras para ser aplicadas en la solución de problemas de contaminación de agua. Los reactores fotocatalíticos son de manejo muy simple, utilizan la energía solar y la radiación de lámparas de luz ultravioleta y son fácilmente adaptables para diversas aplicaciones¹¹⁻¹³.

El tratamiento de aguas residuales puede ser un problema complejo debido a la gran variedad de compuestos y niveles de concentración posibles. Avances en investigaciones acerca del efecto de ciertos contaminantes, normas ambientales más estrictas y factores económicos, han generado nuevas tecnologías. Con el uso de nuevos sistemas de tratamiento en algunas industrias se han dejado prácticas como el almacenamiento de desechos y el confinamiento, que desde el punto de vista de preservación del medio ambiente y de protección de la salud humana no son de ninguna manera recomendables. Los métodos más deseables para tratar efluentes acuosos son aquellos capaces de mineralizar los contaminantes residuales o de transformarlos en materiales inocuos para el hombre y la naturaleza a un bajo costo¹⁴⁻¹⁶.

La descontaminación de aguas residuales con colorantes de la industria textil por medio de fotosensibilizadores evitará que a los recursos hídricos lleguen compuestos orgánicos de difícil degradación. Muchos de ellos son tóxicos, como es el caso de algunos colorantes. Este proceso permitirá que las plantas de potabilización capten aguas de más fácil tratamiento y que la flora y la fauna acuáticas corran menos peligro de extinción.

La presente investigación consistió en el estudio de la degradación y mineralización del colorante Amarillo Novactive F4GL con TiO_2 y FeCl_3 , utilizando los procesos de oxidación avanzada con una lámpara de luz ultravioleta y analizándolas mediante un modelo factorial.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el montaje de los ensayos se utilizó una lámpara de luz ultravioleta de marca MIGHTY PURE, de 60 Hz¹⁷, con una cubeta de vidrio de longitudes 41 cm x 25,5 cm x 20 cm que almacenaba 15 L de muestra. Este sistema se complementó con una bomba que manejaba un flujo de 0,047 L/s. El colorante es uno de los más utilizados en la industria textil para el teñido de prendas (Amarillo Novactive F4GL). La concentración promedio en el agua fue de 300 mg/L para cada uno de ellos, que es la concentración promedio típica de los efluentes industriales textiles que contienen estos colorantes.

En la tabla I se presentan los ensayos que se hicieron. Cada uno de ellos se realizó por triplicado para disminuir el error experimental. Para los experimentos se utilizó el peróxido de hidrógeno como agente oxidante (H_2O_2). La duración de los ensayos fue de dos horas.

Tabla I. Condiciones de los experimentos

Experimento	Colorante (mg/L)	TiO_2 (mg/L) ó FeCl_3 (mg/L)	H_2O_2 (mL/L)
E1	300	0	0
E2	300	30	0
E3	300	30	0.5
E4	300	30	1.0
E5	300	60	0
E6	300	60	0.5
E7	300	60	1.0
E8	300	0	0.5
E9	300	0	1.0

La degradación del colorante se evaluó midiendo la concentración del contaminante por seguimiento del color (fotometría) y la mineralización se llevó a cabo utilizando la técnica del Carbono Orgánico Total (COT).

Para el procesamiento de la información se empleó el programa R 2.7.2 y los métodos utilizados fueron: análisis de varianza (ANOVA) de tres factores y análisis factorial 3³, para optimizar las variables respuesta, que son “porcentaje de degradación” y “porcentaje de mineralización”. A continuación se detalla el procedimiento.

Análisis de Varianza (ANOVA).

El modelo utilizado para el porcentaje de degradación y el porcentaje de mineralización como variables respuesta es de tres factores, efectos fijos completamente aleatorizados con tres réplicas, nivel de confianza del 95% y con una potencia para detectar diferencias significativas de 100%.

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \varepsilon_{ijkl} \sim N(0, \sigma^2)$$

$$i = 1, \dots, 7; \quad j = 1, 2, 3; \quad k = 1, 2, 3; \quad l = 1, 2, 3$$

Donde:

y_{ij} = Denota la k-ésima observación del ij-ésimo tratamiento

μ = Media global

α_i = Efecto del factor tiempo con siete niveles

β_j = Efecto del factor FeCl_3 ó TiO_2

γ_k = Efecto del factor H_2O_2

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Interacción entre el tiempo y FeCl_3 ó TiO_2

$(\alpha\gamma)_{ik}$ = Interacción entre el tiempo y H_2O_2

$(\beta\gamma)_{jk}$ = Interacción entre FeCl_3 ó TiO_2 y H_2O_2

ε_{ijkl} = Error experimental

Es importante anotar que $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$ son los efectos principales y $(\alpha\beta)_{ij}, (\beta\alpha)_{ji}, (\beta\gamma)_{jk}$ son los efectos de interacción de los factores. Estos son constantes y están sujetos a las siguientes restricciones:

$$\sum_i \alpha_i = \sum_j \beta_j = \sum_k \gamma_k = 0 \quad \sum_j (\beta\gamma)_{jk} = \sum_k (\beta\gamma)_{jk} = 0$$

$$\sum_i (\alpha\beta)_{ij} = \sum_j (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \sum_i (\alpha\gamma)_{ik} = \sum_k (\alpha\gamma)_{ik} = 0$$

Las hipótesis con las que fue realizado el diseño experimental de tres factores de efectos fijos son las siguientes:

<p>Factor:Tiempo acumulado (minutos)</p> <p>$H_o : \alpha_i = 0 \text{ con } i = 1, \dots, 7$</p> <p>$H_a : \text{Algún } \alpha_i \neq 0$</p>	<p>Factor: FeCl_3 ó TiO_2</p> <p>$H_o : \beta_j = 0 \text{ con } j = 1, 2, 3$</p> <p>$H_a : \text{Algún } \beta_j \neq 0$</p>
<p>Factor: H_2O_2</p> <p>$H_o : \alpha_k = 0 \text{ con } k = 1, 2, 3$</p> <p>$H_a : \text{Algún } \alpha_k \neq 0$</p>	<p>Interacción:Tiempo*FeCl_3 ó TiO_2</p> <p>$H_o : (\alpha\beta)_{ij} = 0 \text{ con } i = 1, \dots, 7 \text{ } j = 1, 2, 3$</p> <p>$H_a : \text{Algún}(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$</p>
<p>Interacción: Tiempo*H_2O_2</p> <p>$H_o : (\alpha\gamma)_{ik} = 0 \text{ con } i = 1, \dots, 7 \text{ } k = 1, 2, 3$</p> <p>$H_a : \text{Algún}(\alpha\gamma)_{ik} \neq 0$</p>	<p>Interacción: H_2O_2*FeCl_3 ó TiO_2</p> <p>$H_o : (\beta\gamma)_{jk} = 0 \text{ con } j = k = 1, 2, 3$</p> <p>$H_a : \text{Algún}(\beta\gamma)_{jk} \neq 0$</p>

La regla de decisión para aceptar o rechazar la hipótesis nula H_o se basa en el siguiente criterio: Si el $Valor_p \leq \alpha = 0,05$, se acepta H_a . En caso contrario, se rechaza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se presentan los resultados para la degradación y la mineralización de agua con el colorante Amarillo Novactive F4GL.

Agua con colorante Amarillo Novactive F4GL y FeCl_3

Como se observa en la tabla 2 y las figuras 1 y 2, donde se muestran los porcentajes de degradación y mineralización para diferentes ensayos con FeCl_3 , se infiere que en la fotólisis (E1) el porcentaje de degradación y mineralización constituyó el conjunto de los resultados más bajos encontrados para este colorante, que fue de 34.3 y 7.3 %, respectivamente. El empleo de 30 mg/L del FeCl_3 (E2) incrementó el porcentaje de degradación y mineralización del colorante en un 63.2 y 35.2%, respectivamente. Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar si el FeCl_3 fotoactivado es capaz de generar, a partir del agua, suficientes radicales hidroxilo libres como para degradar y mineralizar el Amarillo Novactive F4GL. Por esta razón se hizo la fotocatalisis sin peróxido de hidrógeno.

Tabla 2. Resultados para la degradación y mineralización del Amarillo Novactive F4GL

Ensayo	Resultados con FeCl_3				Resultados con TiO_2			
	% degradación		% mineralización		% degradación		% mineralización	
	%	D.E.	%	D.E.	%	D.E.	%	D.E.
E1	34.3	1.2	7.3	0.3	34.3	0.3	7.3	0.9
E2	63.1	0.8	35.2	0.2	54.1	0.2	27.2	1.0
E3	73.6	0.5	40.8	0.1	68.2	0.4	35.1	1.2
E4	81.8	1.0	49.4	0.5	75.1	0.5	40.7	0.8
E5	70.3	0.3	40.1	0.9	62.0	0.7	33.9	0.7
E6	96.6	0.4	59.7	0.4	79.5	0.4	41.8	0.6
E7	100.0	0.3	70.1	0.2	92.3	0.1	63.4	0.4
E8	48.2	0.7	21.3	1.0	48.2	0.3	21.3	0.3
E9	59.4	0.2	36.7	0.9	59.4	0.4	36.7	0.2

DE: Desviación estándar

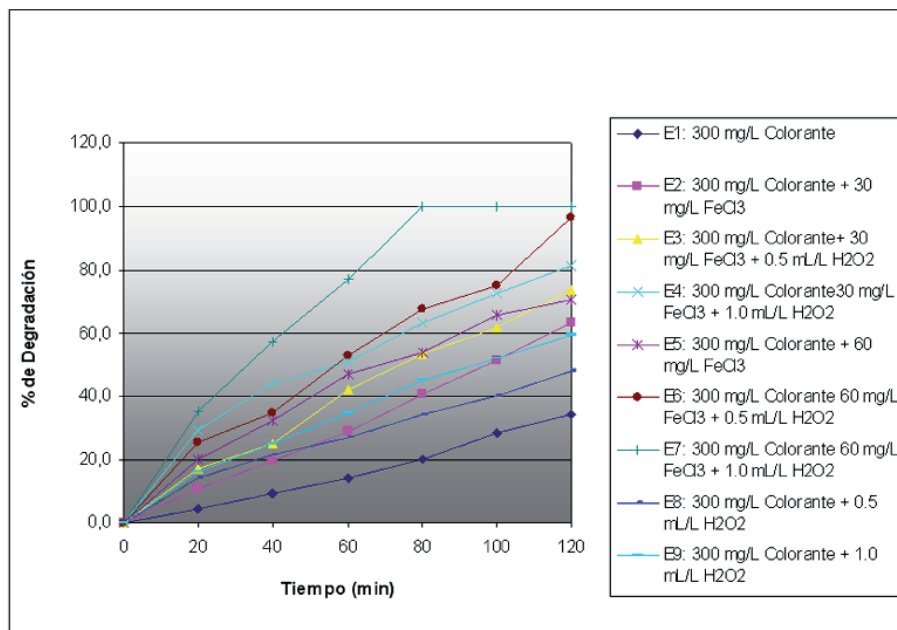
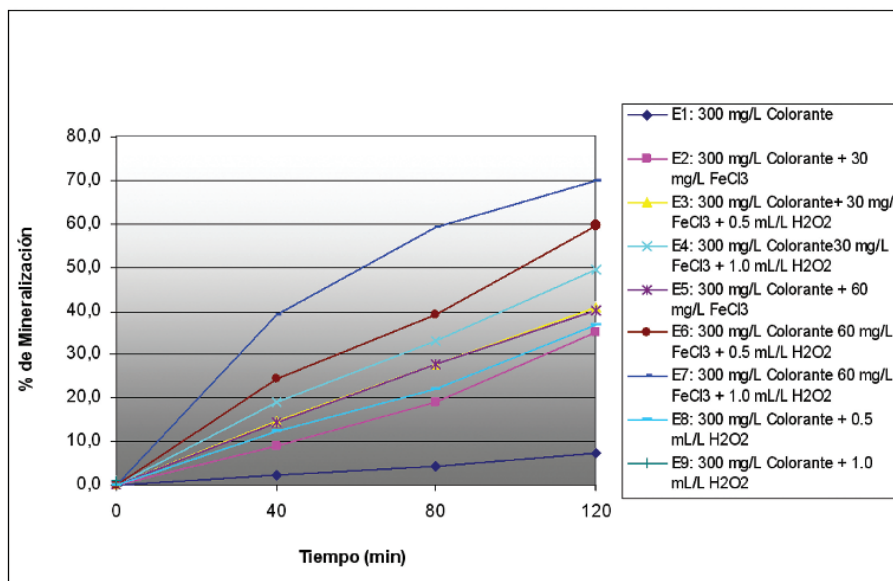


Figura I. Porcentaje de degradación del colorante Amarillo Novactive F4GL con FeCl_3 en los diferentes ensayos

Figura 2. Porcentaje de mineralización del colorante Amarillo Novactive F4GL con FeCl_3 en los diferentes ensayos



En comparación con el uso de únicamente FeCl_3 , el empleo de 30 mg/L de FeCl_3 y 0,5 mL/L de H_2O_2 (E3) incrementó el porcentaje de degradación y mineralización del colorante en un 73,6 y 40,8 %, respectivamente. Esto es explicable, ya que en este ensayo el agente oxidante es el radical hidroxilo. Con el aumento del peróxido de hidrógeno de 0,5 mL/L a 1,0 mL/L (E4) se pretendía incrementar la velocidad de degradación del Amarillo Novactive F4GL, ya que ésta es una fuente de radicales hidroxilo. Comparando los ensayos E3 y E4 se comprobó que, a mayor peróxido de hidrógeno, es mayor el porcentaje de degradación y mineralización del colorante (la cantidad de FeCl_3 fue constante).

El aumento del FeCl_3 de 30 mg/L a 60 mg/L, usando solo el fotosensibilizador (ensayos E2 y E5 respectivamente), incrementó el porcentaje de degradación y mineralización del colorante en un 70,3% y 40,1% respectivamente, aunque el aumento entre ambos ensayos no es significativo (7 y 5%, respectivamente). El ensayo con 60 mg/L de FeCl_3 y 0,5 mL/L (E6) incrementó el porcentaje de degradación y mineralización en un 96,6% y 59,7%, siendo este ensayo uno de los mejores para este colorante. Al aumentar la cantidad de peróxido de hidrógeno en 1 mL/L se obtuvo un 100% de degradación y un 70,1% de mineralización en dos horas, observándose que para este experimento en un tiempo de 80 minutos ya se había degradado completamente el colorante y se encontró, en este mismo tiempo, un porcentaje de mineralización del 59,3%. Se dejó el ensayo hasta dos horas para comprobar la evolución de la mineralización, dando, como se dijo anteriormente, un 70,1% en dos horas. Este es el mejor ensayo obtenido para el colorante Amarillo Novactive F4GL.

Para comprobar la importancia de la oxidación química con peróxido de hidrógeno en esta investigación, se realizaron los ensayos E8 y E9, con 0.5 mL/L y 1.0 mL/L respectivamente. Se obtuvo un 48.2 y un 59.4% de degradación, respectivamente, y 21.3 y 36.7% de mineralización. El porcentaje de degradación y mineralización del colorante aumentó con el incremento en la cantidad del peróxido de hidrógeno, lo cual es muy probable debido a que el H_2O_2 tiene un alto potencial de oxidación.

En la tabla 3 se observa cómo el valor p es ($p = 0,0001 \leq \alpha$) para los efectos principales “tiempo acumulado (minutos), cloruro férrico (mg/L), peróxido de hidrógeno (mL/L)” y sus interacciones. Por lo tanto rechazamos la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%, con lo cual se concluye que estos efectos y sus interacciones son significativos, es decir, el cambio en el tiempo acumulado, la concentración de cloruro férrico (mg/L) y peróxido de hidrógeno (mL/L), así como sus interacciones, influyen significativamente en el porcentaje de degradación y en el porcentaje de mineralización. Como las interacciones son significativas no pueden evaluarse los efectos principales por separado. Por lo tanto, en la figura 3 se presenta el análisis de las interacciones para cada variable respuesta.

Tabla 3. Análisis de varianza “porcentaje de mineralización y porcentaje de degradación del colorante Amarillo con $FeCl_3$ ”.

	Fuente de variación	S.S.	g.l.	C.M.	Val. F	Val. p
Amarillo con $FeCl_3$ Mineralización	A:Tiempo	23542,4	3	7847,48	1661,98	0,0000
	B: $FeCl_3$	7376,3	2	3688,15	781,10	0,0000
	C: H_2O_2	4133,67	2	2066,83	437,72	0,0000
	A*B	3219,04	6	536,506	113,62	0,0000
	A*C	1593,25	6	265,542	56,24	0,0000
	B*C	434,516	4	108,629	23,01	0,0000
	Error	396,629	84	4,72177		
	Total	40695,8	107			
		$R^2 = 0.9902$	R^2 ajustado = 0.9875			
Amarillo con $FeCl_3$ Degradación	A:Tiempo	97696,2	6	16282,7	2141,14	0,0000
	B: $FeCl_3$	24315,0	2	12157,5	1598,69	0,0000
	C: H_2O_2	13196,2	2	6598,12	867,64	0,0000
	A*B	6903,15	12	575,263	75,65	0,0000
	A*C	3090,38	12	257,532	33,86	0,0000
	B*C	701,042	4	175,26	23,05	0,0000
	Error	1140,7	150	7,60468		
	Total	147043,	188			
		$R^2 = 0.9922$	R^2 ajustado = 0.9902			

El R^2 para los modelos “porcentaje de mineralización” y “porcentaje de degradación” es de $R^2=0.9902$ y $R^2=0.9922$, respectivamente, lo que indica que cada modelo explica un 99,02% y 99,22% de los datos obtenidos. Por tanto, el error absorbe un 0,98% y 0,78% respectivamente, debido a factores incontrolables desconocidos. Lo anterior indica que los factores fueron bien seleccionados y controlados para el experimento. El modelo cumplió con los supuestos y explica más del 90% de los datos obtenidos. Se concluye que este modelo es adecuado para explicar el porcentaje de degradación y el porcentaje de mineralización del colorante con FeCl_3 .

En la figura 3 se observa cómo el porcentaje de degradación aumenta durante el tiempo del experimento con cualquier nivel de cloruro férrico y de peróxido de hidrógeno, pero es más óptimo este aumento para 60 mg/L de FeCl_3 y 1 mL/L de H_2O_2 . Trabajar sin peróxido de hidrógeno y sin dióxido de titanio proporciona la menor degradación.

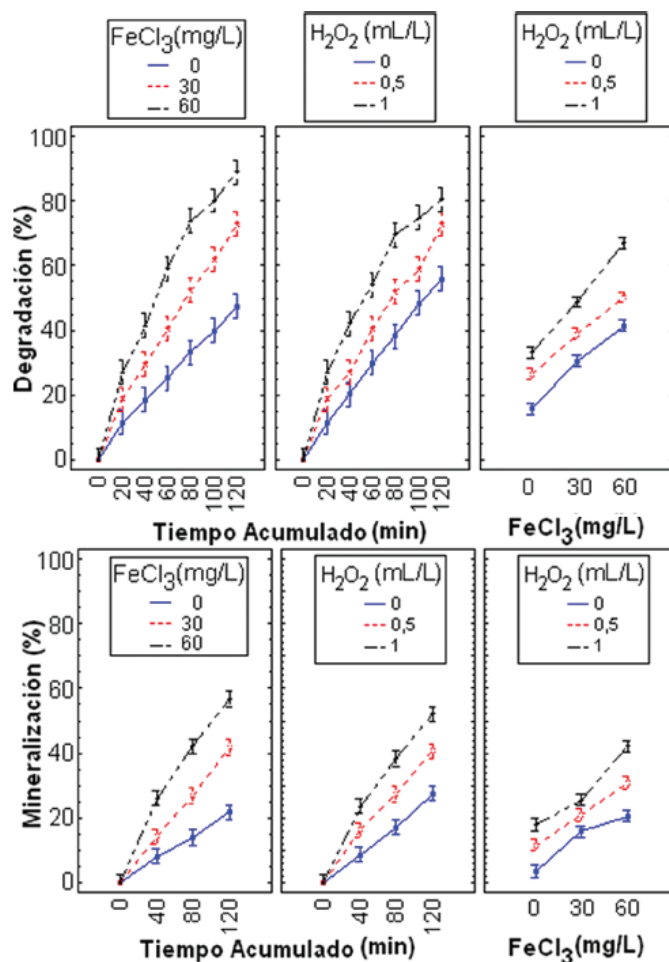


Figura 3. Porcentaje mineralización y degradación vs. tiempo en minutos, FeCl_3 y H_2O_2

Agua con colorante Amarillo Novactive F4GL y TiO_2

La tabla 2 y las figuras 4 y 5 muestran los porcentajes de degradación y mineralización para diferentes ensayos con TiO_2 . Para la fotólisis (E1), los porcentajes de degradación y mineralización fueron los resultados más bajos encontrados para este colorante, 34.3 y 7.3 % respectivamente. El empleo de 30 mg/L del TiO_2 (E2) incrementó el porcentaje de degradación y mineralización del colorante en un 54.1 y 27.2%, respectivamente. Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar si el TiO_2 fotoactivado es capaz de generar, a partir del agua, suficientes radicales hidroxilo libres como para degradar y mineralizar el Amarillo Novactive F4GL. Por esta razón se hizo la fotocatalisis sin peróxido de hidrógeno.

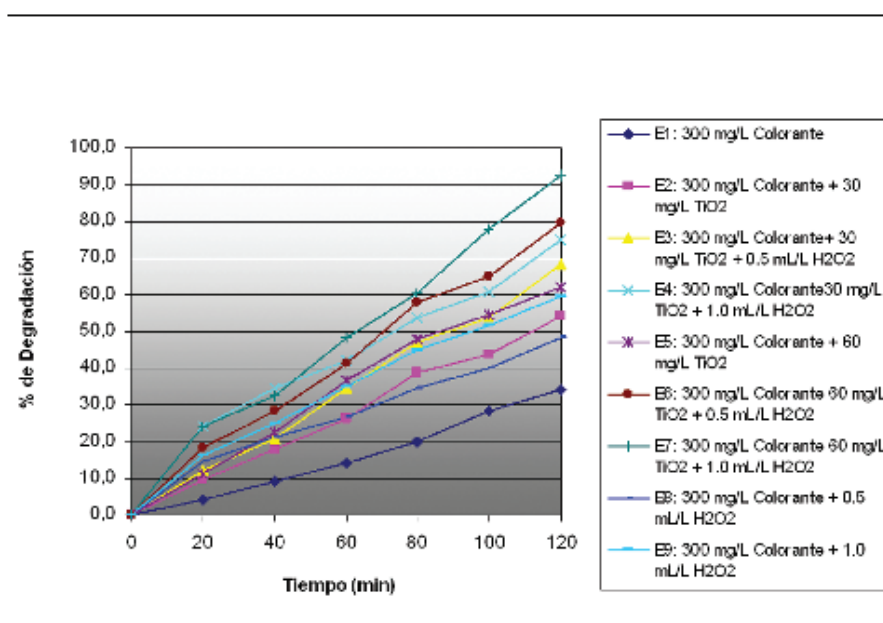


Figura 4. Porcentaje de degradación del colorante Amarillo Novactive F4GL con TiO_2 en los diferentes ensayos

En comparación con el uso de TiO_2 únicamente, el empleo de 30 mg/L de TiO_2 y 0.5 mL/L de H_2O_2 (E3) incrementó el porcentaje de degradación y mineralización del colorante en un 68.2 y 35.1%, respectivamente. Esto es explicable, ya que en este ensayo el agente oxidante es el radical hidroxilo. El radical hidroxilo se forma fácilmente a partir del peróxido de hidrógeno por la presencia de dióxido de titanio cuando éste es fotoactivado por la luz ultravioleta.

Con el aumento del peróxido de hidrógeno de 0.5 mL/L a 1.0 mL/L (E4) se pretendía incrementar la velocidad de degradación del Amarillo Novactive F4GL, ya que esta es una fuente de radicales hidroxilo. Comparando los ensayos E3 y E4 se comprobó que, a mayor peróxido de hidrógeno, es mayor el porcentaje de degradación y mineralización del colorante (la cantidad de TiO_2 fue constante).

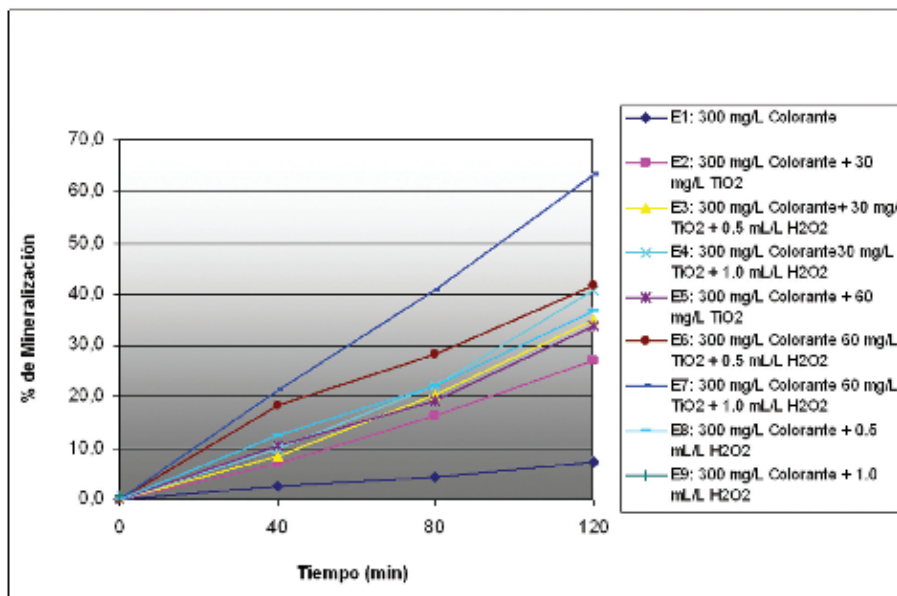


Figura 5. Porcentaje de mineralización del colorante Amarillo Novactive F4GL con TiO_2 en los diferentes ensayos

Es interesante determinar si el TiO_2 fotoactivado es capaz de generar, a partir del agua, suficientes radicales hidroxilo como para degradar y mineralizar el Amarillo Novactive F4GL. Por esta razón se hizo la fotocatalisis sin peróxido de hidrógeno. El aumento del TiO_2 de 30 mg/L a 60 mg/L, usando sólo el fotosensibilizador (ensayos E2 y E5 respectivamente), incrementó el porcentaje de degradación y mineralización del colorante en un 62.0% y 33.9% respectivamente, aunque el aumento entre ambos ensayos no es significativo (8 y 6 %, respectivamente).

El ensayo con 60 mg/L de TiO_2 y 0.5 mL/L (E6), incrementó el porcentaje de degradación y mineralización en un 79.5% y 41.8%, siendo este ensayo uno de los mejores para este colorante con el TiO_2 . Al aumentar la cantidad de peróxido de hidrógeno en 1 mL/L (E7), se obtuvo un 92.3% de degradación y un 63.4% de mineralización en dos horas. Este es el mejor ensayo obtenido para el colorante Amarillo Novactive F4GL con TiO_2 .

En la tabla 4, se observa cómo el valor p es ($p = 0,0001 \leq \alpha$) para los efectos principales “tiempo acumulado (minutos), dióxido de titanio (mg/L), peróxido de hidrógeno (mL/L)” y sus interacciones. Se rechaza la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%, con lo cual se concluye que estos efectos y sus interacciones son significativos, o sea que el cambio en el tiempo acumulado, la concentración de dióxido de titanio (mg/L) y peróxido de hidrógeno (mL/L), así como sus interacciones, influyen significativamente en el porcentaje de degradación y el porcentaje de mineralización del colorante con TiO_2 . Como las interacciones son significativas no pueden evaluarse los efectos principales por separado. Por lo tanto, en la figura 6, se presenta el análisis de las interacciones para cada variable respuesta.

Tabla 4. Análisis de varianza “porcentaje de mineralización y porcentaje de degradación del colorante Amarillo con TiO₂”.

	Fuente de variación	S.S.	g.l.	C.M.	Val. F	Val. p
Amarillo con TiO₂ Mineralización	A:Tiempo	17098,2	3	5699,4	1935,82	0,0000
	B:TiO ₂	2724,12	2	1362,06	462,63	0,0000
	C: H ₂ O ₂	2494,59	2	1247,3	423,65	0,0000
	A*B	1544,89	6	257,481	87,45	0,0000
	A*C	1476,14	6	246,024	83,56	0,0000
	B*C	378,319	4	94,5797	32,12	0,0000
	Error	247,311	84	2,94418		
	Total	25963,6	107			
		R ² = 0.9904	R ² ajustado = 0.9878			
Amarillo con TiO₂ Degradación	A:Tiempo	80433,0	6	13405,5	4195,29	0,0000
	B:TiO ₂	7926,83	2	3963,41	1240,36	0,0000
	C: H ₂ O ₂	7535,18	2	3767,59	1179,08	0,0000
	A*B	3394,28	12	282,857	88,52	0,0000
	A*C	1785,7	12	148,808	46,57	0,0000
	B*C	99,2584	4	24,8146	7,77	0,0000
	Error	479,305	150	3,19537		
	Total	101654,	188			
		R ² = 0.9952	R ² ajustado = 0.9940			

Los coeficientes de determinación (R^2) para los modelos “porcentaje de mineralización” y “porcentaje de degradación” son $R^2=0.9904$ y $R^2=0.9952$, respectivamente, lo que indica que cada modelo explica un 99,04% y 99,52% de los datos obtenidos. Por lo tanto, el error absorbe un 0.96% y 0.48% respectivamente, debido a factores incontrolables desconocidos. Lo anterior indica que los factores fueron bien seleccionados y controlados para el experimento. El modelo cumplió con los supuestos y además explica más del 90% de los datos obtenidos. Se concluye entonces que el modelo es adecuado para explicar el porcentaje de degradación y el porcentaje de mineralización del colorante con TiO₂.

En la figura 6 se observa cómo el porcentaje de degradación aumenta durante el tiempo en minutos del experimento con cualquier nivel de dióxido de titanio y de peróxido de hidrógeno, pero es más óptimo este aumento para 60 mg/L de TiO₂ y 1 mL/L de H₂O₂. Trabajar sin peróxido de hidrógeno o sin dióxido de titanio, proporciona la menor degradación.

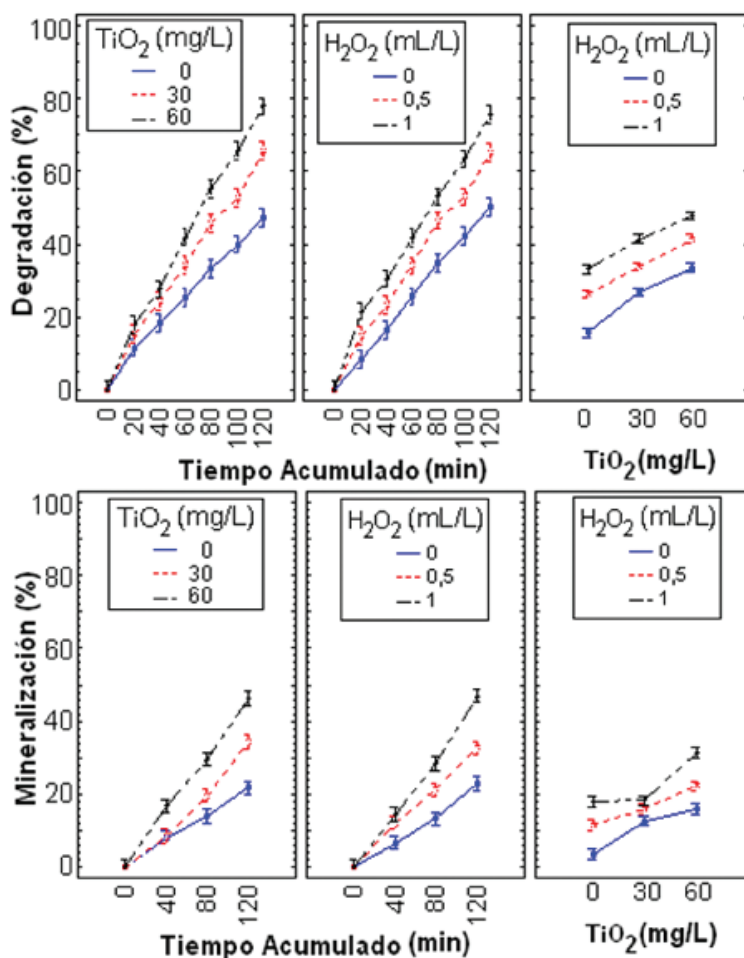


Figura 6. Porcentaje de mineralización y degradación vs. tiempo en minutos, TiO_2 y H_2O_2 .

CONCLUSIONES

Con el cloruro férrico se puede concluir que las mayores degradaciones y mineralizaciones del colorante se obtienen cuando se combina 1 mL/L de peróxido de hidrógeno con 60 mg/L. Para el caso del dióxido de titanio las máximas degradaciones y mineralizaciones también se obtienen bajo estas mismas concentraciones.

Comparando los fotocatalizadores utilizados para el colorante Amarillo Novactive F4GL (FeCl_3 y TiO_2), se concluye que el colorante degrada y mineraliza más rápidamente con el FeCl_3 . Esto sucedió en el ensayo E7 (60 mg/L FeCl_3 y 1.0 mL/L de H_2O_2), donde se obtuvo un porcentaje de degradación de 100 y un porcentaje de mineralización de 70.1.

REFERENCIAS

1. BOGOTÁ. ALCALDÍA MAYOR, DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE, DAMA. Textiles: planes de acción para mejoramiento ambiental. Santafé de Bogotá: DAMA, 1990. 74 p.
2. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando y PEÑUELA MESA, Gustavo Antonio. Fotocatálisis con TiO₂ de los colorantes azul de metileno y naranja reactivo 84 utilizando colector solar. Tesis de Magister en Ingeniería Ambiental. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, 2003. 208 p.
3. ----- . Cinética de degradación y mineralización del colorante naranja reactivo 84 en aguas. En: Revista Lasallista de Investigación. Julio-diciembre, 2005, vol. 2, no. 2, p. 21-25.
4. QUEZADA, Maribel y BUITRÓN, Germán. Biodegradación aerobia de colorantes tipo azo (rojo ácido 151). En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (25: 2-7, noviembre, México) Memorias. México: AIDIS, 1996. p.1-4.
5. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. FeCl₃ y TiO₂ interaction with H₂O₂ in the liquid waste treatment from the textile industry using light trough factorial model. Tesis Doctoral en Ingeniería. Honolulu, Hawaii: Atlantic International University. The Academic Department Of School of Science and Engineering, 2008, 208 p.
6. HOYOSV, Olga E. y ÁLVAREZ, E. Propuesta para la prevención y reducción de contaminantes a las aguas residuales en una planta de teñido de hilos e hilazas. Medellín: SENA, 1999.
7. ARAÑA M, Javier, et al. Role of Fe³⁺/Fe²⁺ as TiO₂ dopant ions in photocatalytic degradation of carboxylic acids. En: Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. Abril, 2003, vol. 197, no. 1, p. 157-171.
8. -----, et al. TiO₂ activation by using activated carbon as a support Part I. Surface characterization and decantability study. En: Applied Catalysis B: Environmental. August, 2003, vol. 44, no. 2, p. 161-172.
9. -----, et al. FTIR study of formica cid interaction with TiO₂ and TiO₂ doped with Pd and Cu in photocatalytic processes. En: Applied Surface Science. December, 2004, vol. 239, no. 1, p. 60-71.
10. -----, et al. TiO₂ activation by using activated carbon as a support Part II. photoreactivity anda FTIR study. En: Applied Catalysis B: Environmental. August, 2003, vol. 44, no. 2, p. 153-160.

11. BAUTISTA, P. et al. Application of fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment. En: Journal of Hazardous Materials. May, 2007, vol. 143, no^s. 1-2, p. 128-134.
12. CHEN, Chuncheng, et al. Photocatalysis by titanium dioxide and polyoxometalate/ TiO_2 cocatalysts. Intermediates and mechanistic study. En: Environmental Science & Technology. Enero, 2004, vol. 38, no. 1, p. 329-337.
13. DOÑA R, José M, et al. The effect of dosage on the photocatalytic degradation of organic pollutants. En: Research on Chemical Intermediates. Marzo, 2007, vol. 33, no^s. 4-5, p. 351-358.
14. PEY Clemente, Jaime. Aplicación de procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles. Tesis. España: Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera. 2008. 198 p
15. RIGA, A, et al. Effect of system parameters and of organic salts on the decolorization and degradation of procion H-EXL dyes. Comparison of $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, Fenton/ UV /Fenton, TiO_2/UV and $\text{TiO}_2/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ processes. En: Desalination. June, 2007, vol. 211, no^s. 1-3, p. 72-86.
16. RODRÍGUEZ R, Alejandra y GARCÉS GIRALFO, Luis Fernando. Evaluación de la fotodegradación sensibilizada con TiO_2 y Fe^{3+} para aguas coloreadas. En: Revista Lasallista de Investigación. Julio-diciembre, 2004, vol. 1, no. 2, p. 54-60.
17. CRUZ CASTELLANOS, Andrés Felipe, et al. Degradación de las aguas residuales de la industria bananera empleando fotocatalisis con dióxido de titanio y lámpara de luz ultravioleta. En: Fotocatálisis y electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales: investigaciones y aplicaciones. Caldas: Corporación Universitaria Lasallista de Medellín, 2007. p. 115-124