

Fotocatálisis heterogénea con TiO_2 y H_2O_2 para el tratamiento de desechos líquidos con presencia de Fenolftaleína generados en los laboratorios de análisis químico de la Universidad del Cauca

Brenda Astrid Castro Guerrero / Viviana Andrea Huetio Vergara¹ / Adriana Consuelo Mera Benavides²

Línea de Investigación: Residuos peligrosos: Semillero de Investigación en Gestión Integral de residuos peligrosos GIRP.

Heterogeneous photocatalysis with TiO_2 and H_2O_2 for the treatment of liquid wastes with phenolphthalein, generated in the chemical analysis laboratories of the University of Cauca

Foto-catálisis Heterogênea com TiO_2 e H_2O_2 para o tratamento de refugos líquidos com presença de Fenolftaleína gerados nos laboratórios de análise química da Universidade del Cauca

RESUMEN

Introducción. La fotocatalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio en suspensión es una tecnología eficiente que actualmente es aplicada para la degradación de contaminantes

¹ Estudiante Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca, miembro GIRP / ² Químico. Especialista en Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Directora GIRP, Docente Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad del Cauca.

Correspondencia: Adriana Consuelo Mera Benavides, email: adrymera@hotmail.com

Fecha de recibo: 06/04/2008 ; fecha de aprobación: 08/08/2008

recalcitrantes. El uso de esta técnica es una buena alternativa para la degradación del indicador ácido-base fenolftaleína presente en los desechos líquidos generados en los laboratorios de análisis químico de la Universidad del Cauca.

Objetivo. Aplicar la fotocatalisis heterogénea utilizando TiO_2 suspendido y H_2O_2 para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador fenolftaleína.

Materiales y equipos. Para el proceso de fotocatalisis se utilizó un sistema compuesto por tres partes: un foto-reactor con una lámpara de luz ultravioleta, con tubo de baja presión de mercurio (longitud de onda 254 nm), una zona de homogenización y una bomba para la recirculación de la muestra. Se analizaron las condiciones bajo las cuales se obtuvieron los mayores porcentajes de degradación del indicador. Las variables específicas analizadas para tal fin, fueron: concentración del catalizador (TiO_2 Degussa P25), concentración del agente oxidante (H_2O_2) y el tiempo de exposición a la luz Uv. La degradación y mineralización del indicador en el proceso fueron evaluadas utilizando métodos colorimétricos.

Resultados. Se determinó que el máximo porcentaje de degradación obtenido fue 86,54% utilizando 500 ppm de TiO_2 , 2600 ppm de H_2O_2 , y un tiempo de exposición a la luz Uv de 8 horas, estas condiciones estandarizadas fueron aplicadas en los desechos

Conclusión. La utilización de concentraciones adecuadas de TiO_2 y H_2O_2 permite obtener buenos porcentajes de degradación del indicador ácido-base fenolftaleína presente en desechos químicos.

Palabras clave: Fotocatálisis heterogénea. Desechos. Fenolftaleína. Degradación.

ABSTRACT

Introduction. The heterogeneous photocatalysis using titanium dioxide in suspension is an efficient technology that at the moment is applied for the degradation of recalcitrant contaminants. The use of this technique is a good alternative for the degradation of the acid-base phenolphthalein indicator, present on the liquid wastes generated by the laboratories of chemical analysis in the University of Cauca.

Objective. To apply the heterogeneous photocatalysis using TiO_2 suspended and H_2O_2 , in the treatment of liquid wastes with the phenolphthalein indicator.

Materials and equipment. For the photocatalysis process, a system composed of three parts was used: A photo-reactor with a lamp of ultraviolet light that has a tube of low pressure of mercury (wavelength 254 nm), a zone of homogenization and a pump for the recirculation of the sample. The conditions from which the highest percentage of degradation of the indicator was obtained, were analyzed. The specific variables analyzed in this treatment were: catalyst concentration (TiO_2 Degussa P25), oxidizing agent concentration (H_2O_2), and the time of exhibition to the light Uv. Results. The degradation and mineralization of the indicator in the process were evaluated by using colorimetric methods.

Results. the highest percentage of degradation was 86,54% using 500 ppm of TiO_2 , 2600 ppm of H_2O_2 , and 8 hours of light Uv time exposition. These standardized conditions were applied for the liquid wastes.

Conclusion. the use of optimum concentrations of TiO_2 and H_2O_2 allows to obtain good degradation percentages of the acid-base phenolphthalein indicator present in chemical wastes.

Key words: Heterogeneous photo catalysis. Reminders. Phenolphthalein. Degradation.

RESUMO

Introdução. A foto-catálisis heterogênea utilizando dióxido de titânio em suspensão é uma tecnologia eficiente que atualmente é aplicada para a degradação de contaminantes recalcitrantes. O uso desta técnica é uma boa alternativa para a degradação do indicador ácido-base fenolftaleína presente nos refugos líquidos gerados nos laboratórios de análise química da Universidade del Cauca.

Objetivo. Aplicar a foto-catálisis heterogênea utilizando TiO_2 suspenso e H_2O_2 para o tratamento de refugos líquidos com presença do indicador fenolftaleína.

Materiais e equipes. Para o processo de foto-catálisis se utilizou um sistema composto por três partes: um foto-reator com um lustre de luz ultravioleta, com tubo de baixa pressão de mercúrio (longitude de onda 254 nm), uma zona de homogeneização e uma bomba para a recirculação da mostra. Analisaram-se as condições sob as quais se obtiveram as maiores percentagens de degradação do indicador. As variáveis específicas analisadas para tal fim, foram: concentração do catalisador (TiO_2 Degussa P_{25}), concentração do agente oxidante (H_2O_2) e o tempo de exposição à luz Uv. A degradação e mineração do indicador no processo foram avaliadas utilizando métodos colorimétricos.

Resultados. Determinou-se que a máxima percentagem de degradação obtida foi 86,54% utilizando 500 ppm de TiO_2 , 2600 ppm de H_2O_2 , e um tempo de exposição à luz Uv de 8 horas, estas condições estandarizadas foram aplicadas nos refugos.

Conclusão. A utilização de concentrações adequadas de TiO_2 e H_2O_2 permite obter boas percentagens de degradação do indicador ácido-base fenolftaleína presente em refugos químicos.

Palavras chaves: Foto-catálisis heterogênea. Refugos. Fenolftaleína. Degradação.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad uno de los problemas ambientales más preocupantes y que ponen en riesgo la salud de la humanidad es el inadecuado tratamiento y disposición final de los residuos líquidos peligrosos. Muchos de ellos se generan en procesos industriales, mineros y petroleros principalmente¹. En los laboratorios de análisis químico se presenta esta misma situación y, aunque el volumen de residuos que se genera en estos es relativamente pequeño en comparación con el que proviene del sector industrial, no debe por ello ser considerado como un problema menor.

En los laboratorios de análisis químico de la Universidad del Cauca se realizan actividades de docencia, investigación, y extensión en las cuales se generan residuos, en su gran mayoría de carácter ácido o básico, y con presencia de indicadores ácido-base que generalmente confieren al líquido residual carga orgánica y coloración. Estos residuos muchas veces son vertidos hacia los desagües y alcantarillados sin ningún tratamiento previo o simplemente se neutralizan, olvidando que en ellos se encuentran presentes sustancias potencialmente nocivas como el indicador ácido-base fenolftaleína.

Aunque la fenolftaleína no evidencia actividad carcinogénica sí induce hiperplasia atípica, proliferación de células hematopoyéticas en el bazo en ratones machos y hembras y toxicidad del riñón y del sistema reproductor en ratones machos². Considerando lo anterior, la fenolftaleína no podría ser dañina para los seres humanos. Sin embargo, los resultados de las investigaciones proporcionan una bandera roja de precaución y por ello es importante su tratamiento antes de ser vertida a las fuentes naturales como hace referencia la ficha de seguridad, la cual sugiere como observación ecológica no incorporarla al suelo ni a los acuíferos³.

La necesidad de preservar el medio ambiente ha llevado a la búsqueda de métodos más eficientes para eliminar compuestos químicos contaminantes generados en diferentes actividades del hombre. Una técnica que permite eliminar compuestos tóxicos y recuperar sustancias es la fotocatalisis, la cual, a partir de la década de los setenta, se viene aplicando en el tratamiento de diferentes desechos químicos que son muy nocivos para el ambiente y la salud. Las sustancias orgánicas complejas, específicamente, se oxidan a especies más simples. Igualmente esa técnica genera la reducción de metales presentes en desechos industriales⁴.

El presente artículo pretende dar a conocer y analizar los resultados obtenidos en la degradación empleando fotocatalisis heterogénea del indicador ácido-base fenolftaleína, comúnmente utilizado en diferentes ensayos químicos desarrollados en laboratorios de análisis químico y, por ende, presente en los desechos generados en los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema usado en la experimentación es un foto-reactor tipo Batch con recirculación de la muestra y una agitación continua dentro de un recipiente de mezcla (zona de homogenización), y consta de: un reactor elaborado en pirex con dos orificios (entrada y salida), sellado herméticamente con esmerilado en la parte superior y con un tapón de caucho en la parte inferior; una lámpara de luz ultravioleta, con tubo de baja presión de mercurio, longitud de onda de 254 nm, 15 Watts de potencia y 45 cm de largo; una zona de homogenización que consta de un recipiente (erlenmeyer) en pirex de 500mL de capacidad y un magneto con recubrimiento de teflón para agitación; una bomba con funcionamiento peristáltico para la recirculación; mangueras de material plástico transparente que conectan el sistema pero que no reaccionan con él; tubo en PVC y caja en triplex para aislar el foto-reactor (Foto 1).

Se optimizaron las concentraciones de dióxido de titanio y peróxido de hidrógeno (Tabla 1), utilizando la misma concentración del indicador fenolftaleína (4 ppm) y un pH fijo (9.25 unidades) en todos los ensayos experimentales desarrollados.

Foto I. Montaje experimental del sistema fotocatalítico

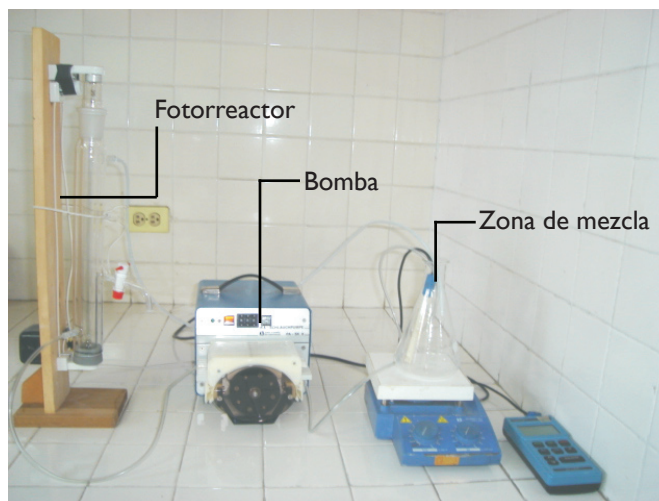


Tabla I. Experimentos para la degradación de la fenolftaleína

Concentración de catalizador (ppm)	Peróxido de hidrógeno (ppm)
500	0
	600
	1300
	2600
1000	0
	600
	1300
	2600

Se realizaron ensayos durante 8 horas de radiación. En cada hora se evaluaron la degradación del indicador midiendo la concentración de la fenolftaleína por seguimiento del color y la mineralización, utilizando la técnica de DQO. Estos dos parámetros se determinaron mediante el método espectrofotométrico, con longitudes de onda de 550 nm para la medición de color y 600 nm para DQO.

El modelo estadístico planteado para la degradación del contaminante se fundamentó en un Diseño de bloques completos al azar⁵.

$$y_{ij} = \mu + \tau_j + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde,

y_{ij} : variable respuesta observada en el tratamiento j, bloque i
 μ : media global de la degradación

τ_j : efecto del tratamiento j

β_j : efecto del bloque i.

ε_{ij} : variación aleatoria asociada al tratamiento j en la repetición i

Esta ecuación permite evaluar cada tratamiento (i) con las condiciones de TiO_2 y H_2O_2 descritos en la Tabla 1, con respecto al tiempo (j).

Los respectivos cálculos se fundamentaron en un análisis de varianza utilizando la Tabla de ANDEVA y pruebas de comparación múltiple de Duncan y Tukey.

Cada ensayo de la Tabla 1 se realizó por duplicado, y a cada una de las muestras tomadas en cada tratamiento se les realizó análisis de color y DQO para evaluar la eficiencia de degradación de la fenolftaleína.

Los resultados de los ensayos de DQO no son reportados en el presente artículo, debido al aumento en la lectura de este parámetro evidenciado en las constates fluctuaciones que presentó esta prueba durante todo el proceso, específicamente en las pruebas donde se adicionó peróxido de hidrógeno. El anterior hecho se atribuye posiblemente a la generación de hidroquinonas en el proceso fotocatalítico originado por la ruptura de la fenolftaleína. Las hidroquinonas son especies con la capacidad de reducir metales⁶, por lo tanto es probable que estuvieran reduciendo el estado de oxidación del cromo hexavalente (Cr^{+6}) a cromo trivalente (Cr^{+3}), incluso a divalente (Cr^{+2}), provocando un aumento en la lectura de la DQO, y, considerando que la prueba de DQO que se ejecutó en esta investigación se basa en una lectura espectrofotométrica del excedente de Cr^{+6} (que no ha sido oxidado por la materia orgánica), se determinó entonces que la técnica de DQO para este caso no era representativa para el seguimiento de la mineralización de la fenolftaleína.

RESULTADOS

Las condiciones de los tratamientos para el indicador ácido-base fenolftaleína pueden observarse en la Tabla 2.

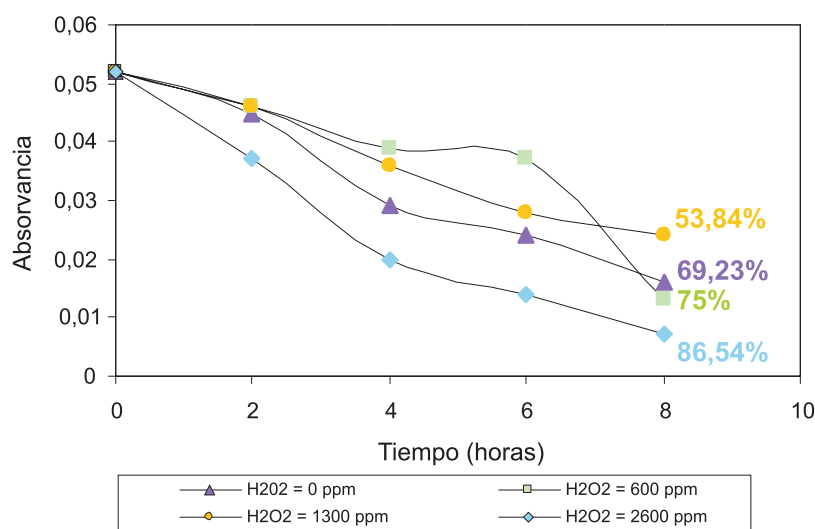
Tabla 2. Condiciones de los tratamientos para el indicador ácido-base fenolftaleína

Condición	TiO_2		H_2O_2			
	a_0	a_1	b_0	b_1	b_2	b_3
Concentración (ppm)	500	1000	0	600	1300	2600

Degradación del indicador utilizado 500 ppm TiO_2

En el tratamiento a_0b_0 se obtuvo una disminución de color del 69,23% sin adición de peróxido de hidrógeno, considerando este ensayo eficiente y viable económicamente por la disminución de costos que ocasiona no utilizar agente oxidante⁷.

Gráfica I. Porcentajes de degradación del indicador fenolftaleína durante 8 horas de radiación Uv, utilizando 500 ppm de catalizador y diferentes concentraciones de agente oxidante, a una longitud de onda de 553 nm



En el tratamiento a_0b_1 , con 600 ppm de H_2O_2 se obtuvo un incremento en la disminución de color del 5,77%, en comparación con el porcentaje obtenido cuando no se adicionó H_2O_2 . En la gráfica I se observa que desde la cuarta a la sexta hora se presenta una pequeña disminución de color, se podría decir que es casi constante. Sin embargo, a partir de la sexta hora y hasta el final del proceso, se presentó una caída importante en la curva representada en la más alta disminución de color de la fenolftaleína en este ensayo, siendo el porcentaje final 75%.

En el tratamiento a_0b_2 con 1300 ppm de H_2O_2 , se presentó una disminución de color del 53,84%, lo que indica que el proceso es eficiente. Sin embargo comparada con el resto de ensayos es muy baja, porque según la teoría cuando se utiliza mayor concentración de peróxido, mayor es la degradación⁸, por lo que se esperaba una buena eficiencia en este tratamiento. Probablemente este hecho se atribuye a problemas de precisión con el pHmetro, porque la medición de color depende de un valor exacto de pH (9,2 unidades) y, si éste varía, la lectura de absorbancia se ve afectada significativamente⁹.

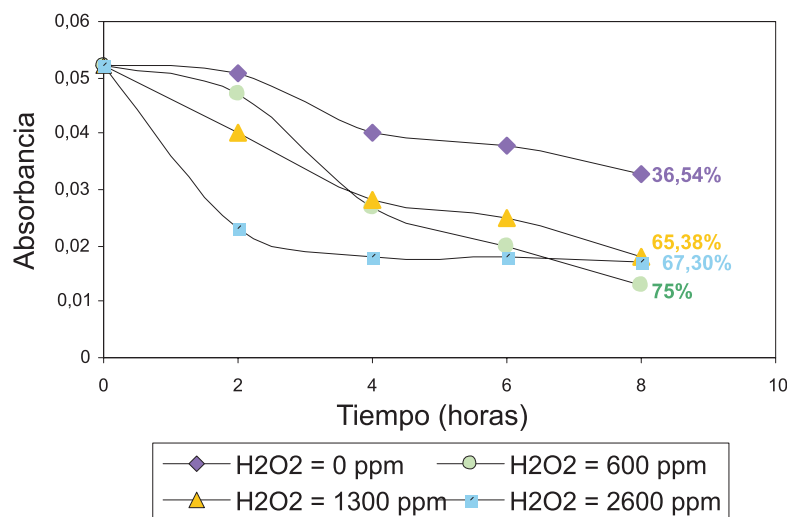
El tratamiento a_0b_3 presentó la mejor disminución de color con un porcentaje del 86,54%. Esto demuestra que al incrementar la concentración de H_2O_2 también aumentan la velocidad y la eficiencia del proceso, debido a que este agente

oxidante es una muy buena fuente de radicales hidroxilo, los cuales rompen los enlaces de la molécula fenolftaleína para degradarla. Además el peróxido es tan efectivo que puede atacar en la superficie del TiO_2 a los compuestos orgánicos absorbidos y no absorbidos y también puede reducirse con los electrones allí generados, formando el anión divalente peróxido, O_2^- . De esta forma los huecos (h^+) del catalizador no corren el riesgo de recombinarse con los electrones y, por el contrario, participan en la generación del radical libre hidroxilo¹⁰. Aunque en este ensayo se utilizaron 2600 ppm de peróxido de hidrógeno y se obtuvo un buen porcentaje de degradación, cabe la posibilidad que al aumentar su concentración la eficiencia también lo haga. Sin embargo es conveniente resaltar que una muy alta cantidad de este agente oxidante puede afectar la superficie del catalizador, en donde se llevan a cabo las reacciones de oxidorreducción, y esto perjudicaría la transferencia de cargas¹¹.

Degradación del indicador utilizado 1000 ppm TiO_2

En el tratamiento a b_0 sin peróxido de hidrógeno, se obtuvo la disminución de color más baja de todos los ensayos, la cual fue del 36,54%. Esto se puede explicar porque la acción de la luz Uv pudo disminuir al utilizar una concentración muy alta de TiO_2 (1000 ppm).

Gráfica 2. Porcentajes de degradación del indicador fenolftaleína durante 8 horas de radiación Uv, utilizando 1000 ppm de catalizador y diferentes concentraciones de agente oxidante, a una longitud de onda de 553 nm



El tratamiento a b_1 , presentó el porcentaje disminución de color más alto (75%) de este grupo de ensayos, y resulta bastante inusual porque contenía la más baja cantidad de peróxido de hidrógeno. En este punto se podría considerar que la

concentración de catalizador, por ser tan alta, de alguna manera compensaba la poca cantidad de agente oxidante, y es explicable porque la eficiencia del tratamiento con TiO_2 y H_2O_2 juntos es mucho mejor, ya que cuando se generan los sitios activos en el catalizador, el peróxido de hidrógeno forma sobre ellos mayor cantidad de radicales hidroxilo para degradar el color. Adicionalmente, al tener más cantidad de catalizador, se encuentra una mayor área disponible para que se lleven a cabo las reacciones de oxidorreducción.

Las condiciones del tratamiento a_1b_2 arrojaron un porcentaje disminución de color del 65.38%. Bastante bueno, pero no tan eficiente comparado con el tratamiento a_1b_1 , donde se utilizó una menor cantidad de peróxido de hidrógeno (600 ppm).

Para el tratamiento a_1b_3 , ilustrado en la Gráfica 2, se observa que la degradación más importante de este ensayo se presentó hasta la segunda hora (55,77%) y que a partir de ésta, y hasta la octava hora, los valores de absorbancia se mantuvieron casi constantes con un mínimo incremento en el porcentaje de degradación (11,53%). Con este tratamiento se esperaba la mayor degradación, por tener las concentraciones más altas de catalizador y agente oxidante, lo que posiblemente ocasionaría mayor formación de pares electrón-hueco y radicales hidroxilo que aumentarían la eficiencia del proceso. Sin embargo esto no ocurrió, ya que posiblemente se impidió el paso de la radiación UV, inhibiendo la activación del catalizador y disminuyendo la degradación de la fenoltaleína¹².

En general, utilizar una concentración de 1000 mg/L no es muy práctico por tener que centrifugar tantas veces para obtener una muestra clarificada y porque la concentración de catalizador es muy alta (para el bajo porcentaje de disminución de color obtenido), situaciones que aumentan los costos del proceso.

Para los tratamientos a_1b_2 y a_1b_3 , con las más altas concentraciones de peróxido de hidrógeno (1300 y 2600 ppm, respectivamente), el porcentaje de degradación del indicador fue bajo. Lo anterior se debe, posiblemente, a que si se excede la concentración de agente oxidante la reacción de fotocatalisis se inhibe porque el peróxido de hidrógeno reacciona con los huecos (h^+) formados sobre la superficie del catalizador, impidiendo la degradación y mineralización de la sustancia a tratar. Aunque la concentración de H_2O_2 depende del contaminante, algunos autores recomiendan utilizar no menos de 100 y no más de 300 ppm. Otra posible causa de los bajos porcentajes de degradación es tener un pH básico, ya que tanto el indicador como el catalizador se cargan negativamente generando repulsiones que van a impedir la rápida degradación y mineralización del contaminante en la superficie del óxido. Además la alta turbidez de la mezcla, generada por la elevada concentración de catalizador utilizado, puede provocar apantallamiento, disminuyendo así la formación de radicales hidroxilo en el proceso y este hecho se hace aún más crítico cuando se utiliza peróxido de hidrógeno¹³.

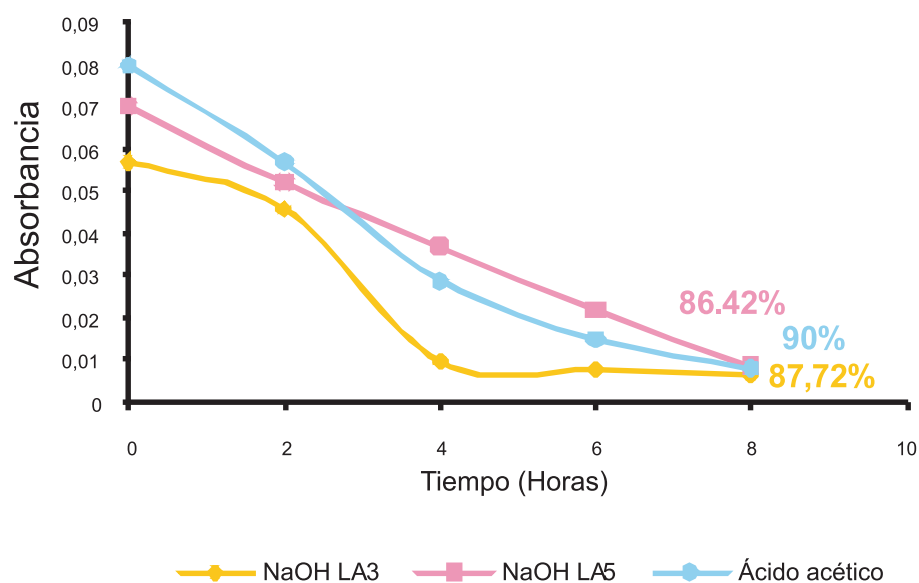
RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO A LOS DESECHOS QUÍMICOS

Después de realizar los ensayos de laboratorio y el análisis estadístico, se determinó que el mejor tratamiento para la degradación del indicador ácido-base fenolftaleína es el a_0b_3 , que presenta las condiciones de 500 ppm de catalizador TiO_2 y 2600 ppm de agente oxidante H_2O_2 , el cual se aplicó a tres de los desechos generados en los laboratorios de análisis químico de la Universidad del Cauca. En la Tabla 3 se reportan las concentraciones del indicador y volúmenes de los desechos seleccionados.

Tabla 3. Desechos seleccionados para aplicación del tratamiento

Desecho	Concentración inicial de Fenolftaleína (ppm)	Volumen (mL)
Estandarización de NaOH (LA 3-nuevo)	4,1	1032
Estandarización de NaOH (LA 5-nuevo)	4,4	772
Titulación de ácido acético (LA 5-nuevo)	4,6	1012

Gráfica 3. Porcentajes de degradación del indicador fenolftaleína al aplicar el tratamiento (a_0b_3) a los desechos seleccionados



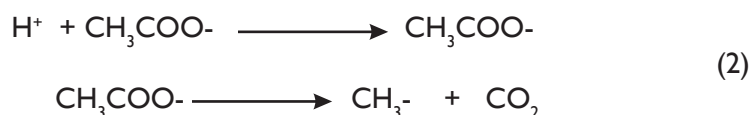
En la Gráfica 3 se observan los porcentajes de degradación del indicador fenolftaleína al aplicar el tratamiento (a_0b_3) a los desechos seleccionados, los cuales fueron: 87,72% para el desecho de estandarización de NaOH (LA 3-nuevo); 86,42% para el desecho de estandarización de NaOH (LA 5-nuevo) y 90% para el desecho de titulación de ácido acético. Los porcentajes obtenidos son mayores comparados con los que se obtuvieron en la estandarización del proceso, lo que corrobora que el tratamiento elegido fue adecuado para la degradación de la fenolftaleína.

En el desecho de estandarización de NaOH (LA 3-nuevo), el porcentaje de degradación del indicador es mayor que el obtenido en la estandarización del proceso. Lo anterior se puede explicar porque al contener hidróxido de sodio y reaccionar con el ácido sulfúrico (contenido también en el desecho), se forma sulfato de sodio (Na_2SO_4), el cual, posiblemente al disociarse en Na^+ y SO_4^{2-} (1), y al ser el Na de carga positiva, se absorbe en la superficie del TiO_2 (cargado negativamente), atrapando los electrones (e^-) generados en el proceso, disminuyendo así el proceso de recombinación y elevando la degradación de la fenolftaleína¹⁴.



Para el desecho perteneciente a estandarización de NaOH (LA 5-nuevo) se obtiene un menor porcentaje de degradación, comparado con los obtenidos en la estandarización del proceso y con el desecho LA 3. Este desecho, a pesar de tener las mismas características del anterior, muestra una degradación más baja. Posiblemente esto se deba a que en la transferencia de cargas ocurridas en la superficie del catalizador el pH de la solución disminuya, cargándose éste positivamente y, al contener más concentración de H_2SO_4 , es probable que los iones sulfatos (SO_4^{2-}) migren a la superficie del TiO_2 en busca de huecos (h^+) y OH^- , formando radicales $\text{SO}_4^{\cdot-}$, los cuales son capaces de oxidar compuestos orgánicos, aunque en menor proporción que los radicales hidroxilo¹⁵.

El porcentaje de degradación obtenido al tratar el desecho de titulación ácido acético fue el más alto, comparado con los obtenidos en los otros desechos tratados y en la estandarización del proceso. Este hecho se explica porque al formarse acetato de sodio (CH_3COONa) en la solución, y al disociarse en Na^+ y CH_3COO^- , juntos eviten la recombinación atrapando los e^- y los h^+ , respectivamente. Además es probable que los radicales metilo ($\text{CH}_3\cdot$) reaccionen de la misma forma que los radicales hidroxilo (2), aumentando así la eficiencia del proceso¹⁶.



DISCUSIÓN

La fotocatalisis heterogénea utilizando TiO_2 y H_2O_2 , es una técnica adecuada para el tratamiento de los desechos líquidos con presencia de fenolftaleína generados

en los laboratorios de análisis químico de la Universidad del Cauca, como se pudo demostrar en esta investigación.

Con la estandarización del proceso se determinó que las condiciones óptimas para el tratamiento fotocatalítico de los desechos líquidos con presencia del indicador ácido-base fenolftaleína son: 500 ppm de catalizador Dióxido de Titanio (TiO_2), 2600 ppm de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y un tiempo de exposición de luz Uv de ocho horas, ya que a estas condiciones se obtuvo el porcentaje de degradación más alto (86,54%) de todos los ensayos realizados.

Al aplicar las condiciones determinadas a los desechos con presencia de fenolftaleína se obtuvieron buenos resultados, ya que se observó una degradación del indicador. Esto se evidencia en los porcentajes de degradación obtenidos, corroborando que el proceso de fotocatalisis heterogénea es adecuado para el tratamiento de este tipo de desechos líquidos.

No fue posible conocer el verdadero porcentaje de mineralización de la materia orgánica que generaba el tratamiento fotocatalítico al indicador fenolftaleína, dado que la técnica de DQO utilizada para el seguimiento de la mineralización presentó inconvenientes por la posible generación de hidroquinonas en el proceso. Por ello se hace necesario el uso de otra técnica para cuantificar esta variable respuesta.

AGRADECIMIENTOS

Para realizar esta investigación se contó con el apoyo económico de la Vicerrectoría de Cultura y Bienestar, la decanatura de la facultad de Ingeniería Civil, el apoyo técnico en la parte estadística del profesor Edwin Rengifo, docente del departamento de matemáticas, y la colaboración del Semillero de Investigación GIRP, los anteriores pertenecientes a la Universidad del Cauca.

REFERENCIAS

1. STAEDTER, Helmut. Tratamientos de desechos peligrosos. En: SEMINARIO. SUSTANCIAS TÓXICAS Y PELIGROSAS. (Marzo, 2005: Medellín Memorias). [CD]. Medellín : El Seminario, 2005.
2. NATIONAL TOXICOLOGY PROGRAM. Report on the toxicology and carcinogenesis study phenolphthalein. In: National Toxicology Program technical report series. (2006); 55 p.
3. MERCK. Fichas de datos de Seguridad.[online]. United States: MERCK, 2006. [Cited June 2006]. Available in: <<http://www.merck.com/>>

4. MALDONADO, M.I., et. al. Plataforma Solar de Almería- CIEMAT. Proyecto CADOX: tecnología para el tratamiento de efluentes industriales. POA's mediante radiación solar. s.l. : s.n., 2005. p. 120-123.
5. WALPOLE, Ronald. Probabilidades y estadística para ingenieros. 6 ed. México: Prentice Hall, 1999. p. 215-220.
6. KIRK, Raymond E. y OTHEMER, Donald F. Enciclopedia de Tecnología Química. México : Unión tipográfica editorial Hispana-Americana, 1972. p. t. IV, 458; t. VIII, 869-873; t. IX, 243-247.
7. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. Fotocatálisis con TiO₂ de los colorantes azul de metileno y naranja reactivo 84 utilizando colector solar. Medellín, 2003, 220p. Tesis (Magister en Ingeniería Ambiental). Universidad de Antioquia. Ingeniería Ambiental.
8. PORRAS HERNÁNDEZ, P. y AVALOS ARENAS, Y. Tratamiento de los residuos líquidos del departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y del Centro de Investigación Ambiental de la Facultad de Ingeniería. Medellín, 2000, p. 32-33. Trabajo e grado (Ingeniero Sanitario y Ambiental). Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería.
9. AYRES, Gilbert H. Análisis Químico Cuantitativo. 2 ed. México: Industria editorial Harla, 1997. p. 461-471.
10. HINCAPIÉ PÉREZ, Margarita La fotocatalisis en el tratamiento de aguas contaminadas. En: Revista Ingenierías - Universidad de Medellín. Vol. 1 (2002); p: 83-91.
11. BLANCO GÁLVEZ, Julian, et. al. Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: Estado del arte, 2002. En: BLESÁ, Miguel. (ed.) Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. Argentina: red CYTED VIII-G., Cáp. 3. p: 417-425.
12. HINCAPIÉ, G. et al. Estudio de la degradación de E.coli empleando un fotorreactor de discos impregnados y un fotorreactor tipo fuente. En: CONGRESO COLOMBIANO DE INGENIERÍA QUÍMICA, LAS CADENAS PRODUCTIVAS. (2004: Manizales). Memorias. Manizales: Memorias Congreso, 2004. p. 10-11.
13. LITTER, M. y MANSILLA, H. (ed.). Remoción de arsénico asistida por luz solar en comunidades rurales de América Latina. Proyecto OEA/AE141/2001. La Plata : Digital Grafic, 2003.
14. TANG, C. y CHEN, V. The photocatalytic degradation of reactive black 5 using TiO₂/UV in an annular photoreactor. In: Water research. Vol. 38, No. 11 (2004); p. 2778.

15. GALINDO, Catherine; JACQUES Patrice and KALT, André. Photochemical and photocatalytic degradation of an indigoid dye: a case study of acid blue 74 (AB74). In: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. Vol. 141, No. 1 (jun. 2001); p. 47-56.
16. GRELA M., et al. Los mecanismos de destrucción de contaminantes orgánicos. En: BLESÁ, M.A. (ed.). Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. La Plata; Buenos Aires : RED CYTED VIII-G, 2003. p. 109-110. 2002.