

Fotodegradación con TiO₂ del colorante Rojo Amaranto en aguas^a

Luis Fernando Garcés Giraldo ¹ / Alejandro Mejía Franco ² / Gustavo Antonio Peñuela Mesa³

¹ Ingeniero Sanitario. Especialista en Cuenca Hidrográficas. Especialista en Ingeniería Ambiental. Magíster en Ingeniería Ambiental. Decano Facultad de Ingeniería Ambiental, Corporación Universitaria Lasallista / ² Estudiante Ingeniería Ambiental, Corporación Universitaria Lasallista / ³ Químico. Doctor en Química Ambiental. Director del GIGA, Universidad de Antioquia.

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

Línea de investigación: Tratamiento de Aguas. Semillero de investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA

Photodegradation with tio2 from the amaranth red dye in water

Resumen

Introducción: la fotodegradación sensibilizada, con TiO₂ y luz solar, 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. Las tecnologías fotocatalíticas son consideradas muy prometedoras para ser aplicadas en la solución de problemas de contaminación de agua. Dichas tecnologías resultan muy atractivas para su implementación, porque el uso de energía solar reduce en forma significativa los costos del tratamiento. El empleo de esta técnica para degradar y mineralizar el colorante Rojo Amaranto, puede imponerse como una alternativa más adecuada que otros procesos de oxidación tradicionales. **Objetivo:** Estudiar la fotocatalisis heterogénea del colorante Rojo Amaranto utilizando un colector solar y dióxido de titanio como catalizador. **Materiales y equipos:** para el proceso de fotocatalisis se utilizó un colector solar cilindro parabólico compuesto (CPC) y se analizaron las condiciones bajo las cuales se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción de color. Las variables analizadas para tal fin, fueron la concentración del catalizador (TiO₂), la concentración del peróxido de hidrógeno y la relación entre ambas frente a la degradación y la mineralización del color. **Resultados:** Para la realización de este trabajo, se utilizaron soluciones sintéticas coloreadas con Rojo Amaranto de 100 mg/L, preparadas con agua potable. El parámetro que más influyó sobre los porcentajes de degradación alcanzados, es el uso de TiO₂ conjuntamente con peróxido de hidrógeno. El máximo porcentaje de degradación obtenido fue del 93.48%, para una concentración de dióxido de titanio de 150 mg/L y 2 ml/L de peróxido de hidrógeno. **Conclusión:** el uso de las concentraciones adecuadas de TiO₂ y H₂O₂ permite obtener buenos porcentajes de degradación y mineralización del colorante Rojo Amaranto, presente en las aguas.

Palabras clave: fotocatalisis, fotodegradación, peróxido de hidrógeno, dióxido de titanio, irradiación solar, colorante, mineralización, degradación.

Abstract

Introduction: Sensitized biodegradation, with TiO₂ and sun light, is a technique which can be used as a depuration system by itself, or as a tertiary process, especially for industrial remains treatment. Photocatalytical technologies are very promising for their application on the solving of water contamination problems. Those technologies are very well regarded to be implemented, because the use of sun light reduces in a great measure the costs of the treatment. The use of this technique to degrade and mineralize the Amaranth Red Dye, can be implemented as a more appropriate alternative than other traditional oxidation processes. **Objective:** To study heterogeneous catalysis of Amaranth Red dye, by the use of a sun light collector and titanium oxide as a catalyst. **Materials and methods:** For the photocatalysis process, a composed cylinder parabolic sunlight collector (CPC) was used and the conditions under which the higher measurements of color removal were gotten were analyzed. The variables analyzed for this purpose were the concentration of the catalyst (TiO₂), the hydrogen peroxide concentration and the relation between both of them before the degradation and mineralization of the color. **Results:** For this work synthetic solutions dyed with 100mg/L Amaranth Red color prepared with potable water. The most influent parameter on the degradation percentages reached, is the use of TiO₂ mixed with hydrogen peroxide. The maximum degradation percentage obtained was 93.48% for titanium dioxide concentration of 150mg/L and 2 ml/L of hydrogen peroxide. **Conclusion:** The used of appropriate concentrations of TiO₂ and H₂O₂ allows to obtain good degradation and mineralization percentages of the Amaranth Red Dye contained in water.

Key words: Photocatalysis. Photodegradation. Hydrogen peroxide. Titanium dioxide. Sun irradiation. Dye, mineralization. Degradation.

^a Investigación financiada con recursos del Fondo de Fomento a la Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista y del Grupo de Investigación y Gestión Ambiental (GIGA) de la Universidad de Antioquia

Introducción

Bajo ciertas condiciones, la luz puede usarse, para activar materiales que faciliten la ruptura de enlaces químicos en moléculas de compuestos contaminantes para producir otros inocuos o menos peligrosos.¹

Es así como las técnicas de oxidación avanzada se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. Estos procesos involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidróxilo (HO·), el anión superóxido ($O_2^{\cdot-}$) y electrón solvatado (e_{ac}^-). Estos radicales pueden ser generados por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, y poseen alta efectividad para la oxidación de materia orgánica, produciendo radicales orgánicos que se descomponen rápidamente, algunos de ellos hasta la mineralización de los compuestos, formándose compuestos inorgánicos como CO_2 , H_2O , entre otros, dependiendo de la composición elemental del contaminante¹⁻⁴.

La luz puede tener un efecto dramático sobre algunas moléculas o sólidos denominados fotosensibilizadores, porque cuando estos absorben los cuantos de luz o fotones, su habilidad de perder o ganar electrones se altera, llevándolos a un estado electrónico excitado que les proporciona propiedades de mejor oxidante o mejor agente reductor. Los procesos de transferencia de electrones y la presencia de medios de contacto (como el agua) pueden generar por consiguiente, las especies reactivas usadas para la descomposición de los contaminantes. Algunos de los procesos que utilizan esta tecnología son TiO_2/UV , H_2O_2/UV , Foto-Fenton y procesos con ozono.¹

Uno de los procesos de oxidación avanzada (POA) más prometedor para el tratamiento de aguas contaminadas con contaminantes sintéticos como los colorantes es la fotocatalisis heterogénea mediada por sensibilizadores, la cual se basa en la destrucción de los contaminantes en la superficie del sólido (catalizador) excitado fotoquímicamente con energía radiante.

Sin embargo, las investigaciones sobre la degradación de los contaminantes orgánicos a través

de este tipo de técnicas, se han limitado al estudio de unos pocos compuestos. Es por esta razón, que con el presente artículo, se pretende dar a conocer y explicar los resultados obtenidos acerca del comportamiento en la degradación y la mineralización del colorante Rojo Amaranto, comúnmente utilizado en la industria de alimentos.

Materiales y métodos

El colector solar que se utilizó en la experimentación tiene tres módulos (foto1), cada uno compuesto por ocho tubos de vidrio (Schott-Duran) de 48 mm de diámetro externo y 150 cm de largo y lámina de aluminio, ya que permite la reflectancia de la radiación ultravioleta de la luz solar, todo el conjunto tiene una bomba de recirculación y un tanque. El colector solar tiene una inclinación de 6° con respecto al suelo, de frente al Norte, ya que debe coincidir con la posición geográfica del lugar (Corporación Universitaria Lasallista), con el fin de evitar el ajuste diario de la posición respecto a la elevación solar y tener la mayor eficiencia de recolección de radiación.



Foto 1. Colector solar cilindro parabólico empleado para el tratamiento del agua coloreada con Rojo Amaranto.

Se optimizaron las concentraciones del dióxido de titanio y del peróxido de hidrógeno; para esto se varió una sola condición en cada uno de los experimentos a realizar (tabla 1), con el objetivo de estudiar la influencia en la degradación y mineralización del agua coloreada con Rojo Amaranto. En la optimización de las condiciones del proceso se determinaron las constantes de velo-

cidad de degradación y la constante de velocidad de mineralización del colorante, para posteriormente, determinar los tiempos de vida media para cada una de estas variables.

La degradación se evaluó midiendo la concentración del contaminante por seguimiento del color (fotometría), y la mineralización utilizando la técnica de carbono orgánico total (COT).

Tabla 1. Condiciones de los experimentos para el colorante Rojo Amaranto

Experimento		Concentración	Concentración	Cantidad
Nº	Descripción	Colorante (mg/l)	de TiO ₂ (mg/L)	de H ₂ O ₂ (ml/L)
E1	Oxidación	100	0	1
E2	Con H ₂ O ₂ .	100	0	2
E3		100	50	0
E4		100	50	1
E5		100	50	2
E6		100	100	0
E7		100	100	1
E8	Fotocatálisis	100	100	2
E9	Heterogénea	100	150	0
E10		100	150	1
E11		100	150	2
E12		100	30	0
E13		100	30	1
E14		100	30	2

El modelo estadístico planteado para la degradación del colorante Rojo Amaranto se fundamenta en la siguiente ecuación de degradación, el cual fue analizado a través del paquete estadístico Statical Anslisis System (SAS).

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ij}$$

Donde;

- μ : es la media global de degradación.
- α_i : es el efecto del TiO₂ en la degradación.
- β_j : es el efecto del H₂O₂ en la degradación.
- $(\alpha\beta)_{ij}$: es el efecto de interacción entre el TiO₂ y el H₂O₂ en la degradación.
- ϵ_{ij} : es el error aleatorio.

La ecuación obedece a un modelo factorial de dos niveles (5x3) completamente aleatorizado, con interacción entre el fotocatalizador (TiO₂) y el agente oxidante (H₂O₂). La variable de respuesta para el colorante es el porcentaje de degradación del color en ocho horas de irradiación solar.

Cada ensayo de la tabla 1 se realizó por triplicado. A todas las muestras tomadas durante cada uno de ellos, se les realizó el análisis de color para medir la degradación y sólo a las muestras 0, 4 y 8 de cada ensayo se les realizó la prueba de Carbono Orgánico Total (COT) con el objeto de determinar el grado de mineralización. La razón por la que no se le realizó el análisis de COT a la totalidad de las muestras tomadas, fue por los costos que incurren en la medición de este parámetro.

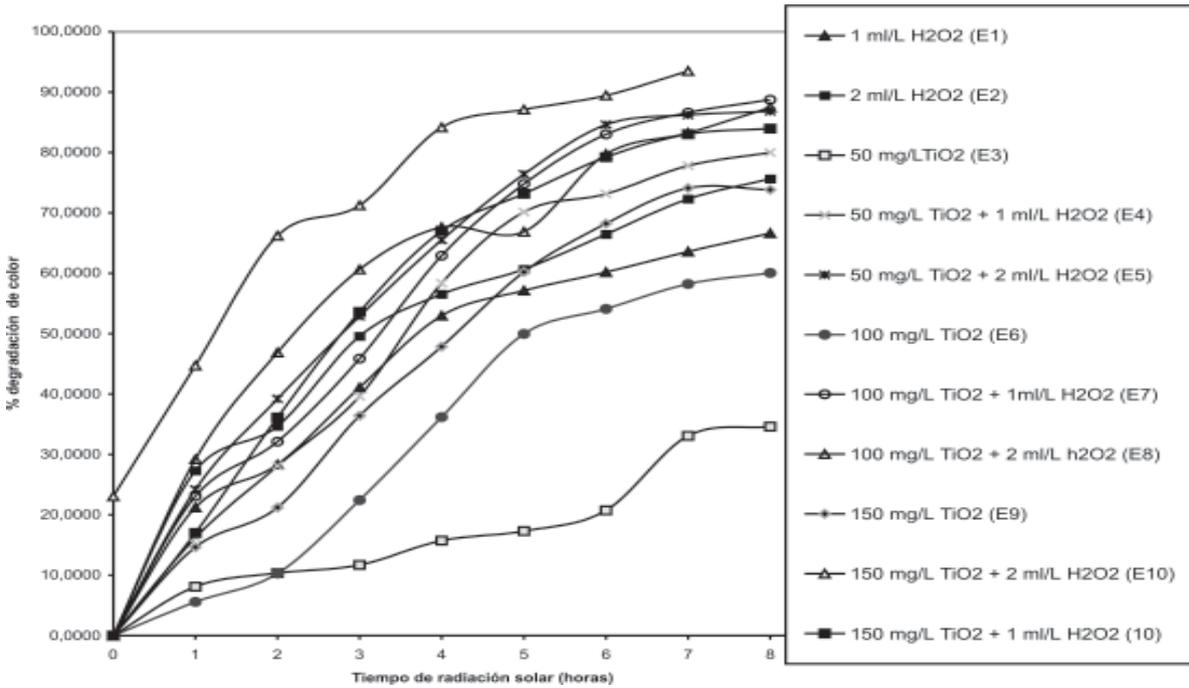
Resultados

Oxidación con peróxido de hidrógeno Durante el proceso de oxidación del colorante a lo largo de ocho horas de irradiación solar, usando 1 ml/L de H₂O₂ se obtuvieron porcentajes de degradación del 67.83%, 66.82% y 65.29% al final del tratamiento en las tres replicas realizadas. En promedio, el porcentaje de degradación de dicho colorante es del 66.64% para esta dosis gráfica 1. Dicha degradación se puede atribuir a la ac-

ción de la luz solar, específicamente a aquella parte del espectro visible en el que se ubica la luz UV, la cual al entrar en contacto con el peróxido de hidrógeno ($h\nu = 2.2 \text{ eV}$) genera una serie de reacciones que producen radicales libres, con un potencial de oxidación un poco más alto que el del peróxido de hidrógeno, iniciando así el proceso de oxidación del colorante.

Cuando se emplean 2 ml/L de H_2O_2 en la oxidación del colorante, se obtiene un incremento en la degradación de un 8.78% en comparación con el porcentaje promedio de degradación que se obtuvo al utilizar una dosis de 1 ml/L de H_2O_2 (grá-

fica 1). Dicho incremento se debe a que existe mayor cantidad de agente oxidante, es decir de peróxido de hidrógeno, ya que este actúa como agente oxidante de dos formas: una como peróxido y otra generando radicales hidroxilos (OH). Esta última es más eficiente porque el $\cdot\text{OH}$ es un buen agente oxidante. Sin embargo, el $\cdot\text{OH}$ se forma absorbiendo luz ultravioleta (UV) menor de 290 nm o en la superficie de un semiconductor (como el TiO_2), cuando está activado por la luz UV. Por lo tanto, cuando el peróxido de hidrógeno está solo y con radiación solar, el peróxido de hidrógeno actúa como agente oxidante, pero como peróxido.



Gráfica 1. Porcentajes de degradación del colorante Rojo Amaranto durante 8 horas de radiación solar a una longitud de onda de 525 nm.

Fotocatálisis heterogénea: El empleo de 50 mg/L de TiO_2 puede hacer posible la degradación del colorante, sin hacer uso de un agente oxidante como lo es el peróxido de hidrógeno. Esto es posible debido a que el agua forma radicales libres $\cdot\text{OH}$ en el hueco del TiO_2 , cuando está activado por la luz UV. Sin embargo los porcentajes de degradación son mucho menores (37.81%, 24.54% y 41.51%, para un promedio de 34.62% (ver figura 2) que cuando se utilizan el peróxido de hidrógeno debido a que es más fácil la formación de radicales hidroxilo a partir del peróxido de hidrógeno.

Los porcentajes de degradación del colorante usando 100 y 150 mg/L de TiO_2 , sin usar H_2O_2 , son un poco mayores que cuando se usa 50 mg/L de TiO_2 , (sin usar H_2O_2) (ver figura 2) debido a que existen más sitios activos (más huecos del TiO_2 activados) y por lo tanto más moléculas de agua formando radicales hidroxilos. Aparentemente, se pensará que se podrán utilizar cantidades mucho mayores a 150 mg/L de TiO_2 , para alcanzar un 100% de degradación del colorante, pero podría ocurrir que a mayor concentración de TiO_2 no se permita la entrada de luz UV al interior de los tubos del colector solar, evitando

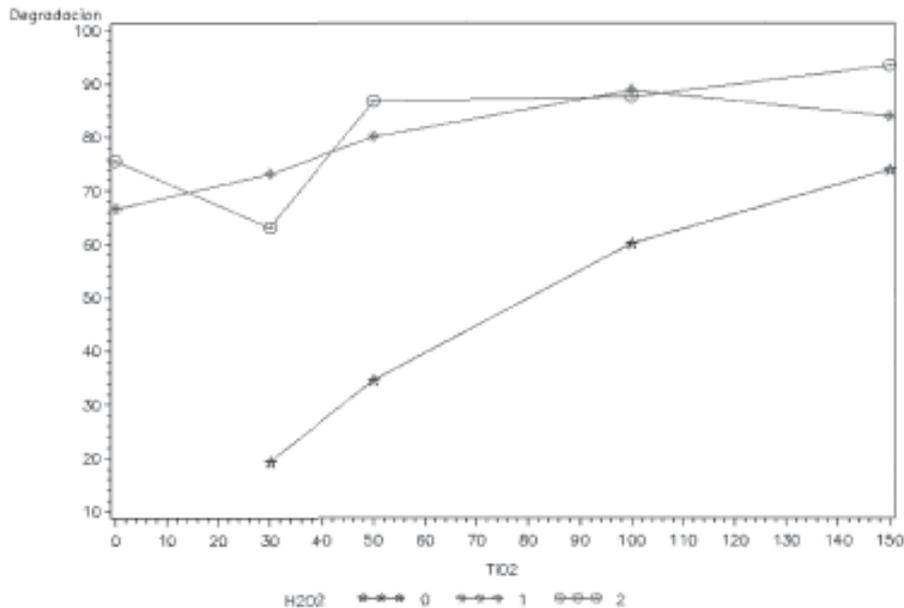
así la formación de los huecos en la superficie del TiO_2 .

Con el uso de 1 ml/L de H_2O_2 y 50 mg/L de TiO_2 , en comparación de sólo peróxido, se pueden obtener excelentes porcentajes de degradación para el colorante Rojo Amaranto. En las tres réplicas realizadas se dieron degradaciones del orden del 78.63, 72.42 y 88.93% con un valor promedio equivalente al 79.97% (figura 2). Esto es explicable, ya que la sustancia que en este caso está actuando como agente oxidante del colorante es el radical hidróxilo, formado a partir de las reacciones de óxido - reducción que se llevan a cabo en la superficie del dióxido de titanio excitado con luz UV. El cual es mucho más poderoso que el H_2O_2 como oxidante.

Al incrementar la concentración del H_2O_2 de 1 a 2 ml/L para la misma cantidad de TiO_2 (50 mg/L) se buscaba hacer mayor la eficiencia en el tratamiento del agua coloreada. Los resultados obtenidos al pasar las 8 horas de radiación solar para cada una de las replicas dieron como resultado un promedio de degradación del 86.82% (figura 2), que en comparación con el resultado de la dosis de 1ml/L de H_2O_2 y 50 mg/L de TiO_2 es mayor. Esto se debe a que, con el aumento en la

concentración de H_2O_2 , se está aumentando la cantidad de radicales libres hidróxilos, que van a actuar como agentes oxidantes para la degradación del color. De esta manera se comprueba que el uso de esos 2 ml/L de H_2O_2 incrementan la degradación del color en un 6.85% más. Aunque este valor no es estadísticamente significativo se recomienda que para el tratamiento de aguas coloreadas con Rojo Amaranto en una concentración de 100 mg/L se emplee 2 ml/L de peróxido de hidrógeno y 50 mg/L de dióxido de titanio para acelerar el proceso de degradación y garantizar así la formación de suficientes radicales hidróxilos.

En comparación con el uso de solo 50 mg/L de TiO_2 , el empleo de una dosis de 100 mg/L de este, puede generar un incremento significativo en la degradación del color dando en promedio un porcentaje de degradación del 60.06% en 8 horas de radiación solar (figura 2). Esto es explicable, ya que el agua forma radicales hidróxilos libres en el hueco formado en la superficie del dióxido de titanio cuando es activado por la luz UV. Generando así los suficientes radicales OH responsables de la degradación del color. Además el incremento en la concentración de TiO_2 va a permitir tener mas sitios activos y por consiguiente mas moléculas de agua formando radicales OH.



Gráfica 2. Efectos (TiO_2 , H_2O_2) expresados en mg/L y ml/L respectivamente, frente al porcentaje de degradación del colorante Rojo Amaranto

En la fotocatalisis heterogénea del colorante Rojo Amaranto, al emplearse una dosis de 1 ml/L de peróxido de hidrógeno y 100 mg/L de dióxido de titanio, se puede incrementar la degradación promedio del color en un 8.76% más que la determinada a 50 mg/L de TiO_2 con 1 ml/L de H_2O_2 la misma dosis de peróxido de hidrógeno. Este incremento es posible porque, el dióxido de titanio presente en la solución de agua coloreada, al ser activado fotoquímicamente por efecto de la luz UV, va a generar más sitios activos, es decir, más huecos sobre los cuales el peróxido de hidrógeno formará mayor cantidad de radicales hidróxilos para degradar el color.

Cuando se trabajó la fotocatalisis heterogénea con una dosis de 150 mg/L de TiO_2 pero sin usar H_2O_2 . El porcentaje promedio de degradación alcanzado fue del 78.35% (figura 2). Este valor, aunque estadísticamente no es significativo, puede ser comparable con el valor de degradación obtenido en el ensayo en el que sólo se usaron 50 mg/L de dióxido de titanio (34.62% de degradación de color), dado que para aumentar la degradación del color un 43.73% se hizo necesario incrementar la dosis de TiO_2 en un 100%. El aumento en el porcentaje de degradación percibido en este ensayo es explicable, en tanto que el agua, al encontrar mas sitios activos debido al dióxido de titanio excitado por la luz UV en los cuales se van a dar las reacciones de óxido-reducción, formará los suficientes radicales hidróxilos para oxidar el colorante.

Con respecto a los resultados de mineralización alcanzados para las dosis empleadas en los experimentos E5 y E11 (tabla1), se podría decir que el tratamiento no tuvo ningún efecto significativo en la transformación de los compuestos químicos contaminantes en otras sustancias que garantizaran la efectiva eliminación del color presente en el agua dentro del proceso de fotodegradación solar, puesto que los porcentajes de mineraliza-

ción promedio alcanzados que se consignan son del 50%.

En el ensayo con 2 ml/L de peróxido de hidrógeno y 50 mg/L de dióxido de titanio, con la cual se obtuvieron excelentes resultados de degradación (86.8%), la mineralización no tuvo el mismo comportamiento: Sólo se alcanzo el 25.91% de mineralización. Quizás esto se deba principalmente a que el tiempo de radiación solar (8 horas) no fue suficiente para alcanzar porcentajes de mineralización mayores. También pudo ocurrir por la composición química del colorante, en la que los radicales hidróxilo sólo podrían romper la molécula de color pero no transformarla en otras sustancias menos complejas e inocuas tales como CO_2 y H_2O .

Análisis estadístico para la degradación del colorante

El modelo empleado plantea dos hipótesis las cuales se denominan A_0 y A_1 :

A_0 = el efecto de cada una de las variables consideradas en la investigación, al igual que el efecto conjunto de estas sobre la degradación del color son iguales a cero. A_1 = la hipótesis anterior (A_0) es diferente de cero.

A_0 : $\alpha_i, \beta_j, (\alpha\beta)_{ij} = 0$; (el modelo no es significativo)
 A_1 : $\alpha_i, \beta_j, (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$; (el modelo es significativo)

El error máximo permisible o aceptado por el (ANOVA) para el modelo estadístico es del 5%. Considerando este valor, se puede decir que el modelo es significativo, ya que el valor de $p = 0.0001$ (tabla 2), arrojado por el análisis de los resultados corridos a través de SAS, es menor que el 0.05 permisible. Según este valor, el modelo empleado sirve para explicar la degradación del colorante Rojo Amaranto de acuerdo con los factores definidos (TiO_2 , H_2O_2 y TiO_2/H_2O_2).

Tabla 2. Información de la significancia del modelo aplicado.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio al cuadrado	Valor F Value	Valor de p
Modelo	13	17449.7954	1342.29195	29.95	<.0001
Error	28	1254.92776	44.81885		
Total corregido	41	18704.7231			

En la figura 3 se puede ver claramente el efecto que tiene el dióxido de titanio en la degradación en la cual, para alcanzar una degradación máxima del 70% aproximadamente, se requieren 150 mg/L de TiO_2 máxima dosis empleada en los experimentos realizados. Colocando así las concentraciones de 30, 50, 100 y 150 mg/L de TiO_2 en un primer grupo en el que se alcanzaron las menores degradaciones. Cuando se emplearon estas mismas concentraciones de una forma conjunta con peróxido de hidrógeno en concentraciones de 1 y 2 ml/L, los porcentajes subieron significativamente con un máximo de degradación del 94%. Colocando de esta manera a las dosis mayores de 50 mg/L de TiO_2 en cualquier combinación con H_2O_2 en un segundo grupo en el que se alcanzaron los mayores porcentajes de degradación. Sólo aquellos experimentos en los que se emplearon 30 mg/L de dióxido de titanio, la degradación de color decreció conforme pasaba el tiempo de radiación solar. Además, se puede evidenciar que cuando se aumenta la dosis de dióxido de titanio y la de peróxido de hidrógeno, los porcentajes de degradación aumentan. En esta misma figura se puede confirmar que independientemente de que se emplee 50 mg/L de TiO_2 con 2ml/L de H_2O_2 , 100mg/L de TiO_2 con 1 o 2 ml/L de H_2O_2 o 150 mg/L de TiO_2 con 1 o 2 ml/L de H_2O_2 se tienen las máximas degradaciones al final del tratamiento.

Discusión

La fotocatalisis heterogénea aceleró la degradación del colorante Rojo Amaranto con respecto al proceso en el que sólo se usó peróxido de hidrógeno, alcanzando así porcentajes de degradación hasta del 93.5%. Los mejores ensayos realizados que mostraron los mayores porcentajes de degradación del colorante y por consiguiente los mejores resultados de mineralización en su orden son: E11, E10, E7, E y E5

Para obtener buenos resultados de degradación del colorante Rojo Amaranto durante el proceso de fotocatalisis en el colector solar, se hace indispensable hacer uso del peróxido de hidrógeno como agente oxidante, ya que en los ensayos en los que éste se aplicó, fue donde se obtuvieron los mayores porcentajes.

La velocidad de las reacciones que se llevaba a cabo dentro del proceso fotocatalítico, respon-

den positivamente frente al aumento en las concentraciones tanto de peróxido de hidrógeno como de dióxido de titanio. De esta forma, cuando se incrementan conjuntamente una con respecto a la otra llegando a sus concentraciones máximas (2 ml/L H_2O_2 y 150mg/L TiO_2), las velocidades de Reacción son mucho mayores, posibilitando así que se requiera de menos tiempo para degradar el 50% del color presente en el agua.

El menor tiempo de vida media del colorante Rojo Amaranto se registró para el ensayo E11 (150 mg/L TiO_2 y 2 ml/L H_2O_2), el cual fue de 1.9 horas, ensayo en el cual se obtuvo el mejor porcentaje de degradación y mineralización, 93.4 y 39.4% respectivamente.

Durante la fotocatalisis del agua coloreada con el Rojo Amaranto, no se alcanzó el 50% en la mineralización de color según el análisis estadístico (ANOVA) realizado. Esta variable depende significativamente del uso del peróxido de hidrógeno, que para tener efectos significativos mayores al 50%, se debe aplicar en dosis mucho mayores a 2ml/L. Por lo tanto, el proceso de fotocatalisis fue mucho más efectivo para la degradación de color que para la mineralización del mismo.

Las concentraciones óptimas de catalizador y agente oxidante para tratar aguas que contienen el colorante Rojo Amaranto en una concentración de 100mg/L, encontradas en esta investigación son: 150 mg/L de TiO_2 y 2 ml/L H_2O_2 .

La fotodegradación sensibilizada con dióxido de titanio y peróxido de hidrógeno como agente oxidante utilizando colector solar para el tratamiento de aguas coloreadas con Rojo Amaranto, es un proceso altamente atractivo y efectivo, siempre y cuando se trabaje preferiblemente el peróxido de hidrógeno en su máximo nivel (2 ml/L) en combinación con dosis entre 50 y 150 mg/L de dióxido de titanio, donde siempre las degradaciones van a ser superiores al 85%.

En el ensayo en el que se emplearon 50 mg/L de dióxido de titanio y 2 ml/L de peróxido de hidrógeno se obtuvo un porcentaje de degradación del 86.81%, significativamente alto para una dosis de TiO_2 baja, y un tiempo de vida media del colorante de 2.8 horas, el cual se encuentra por debajo del tiempo de vida media logrado en el ensayo 11 (E11), considerado como el mejor ensayo. Este

es el parámetro bajo el que se ha seleccionado el ensayo 11 como la dosis óptima a emplear en términos de eficiencia y rapidez de las reacciones.

En la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio para el colorante Rojo Amaranto, el porcentaje de mineralización se debió en mayor medida al uso de peróxido de hidrógeno, mientras que la degradación se debió tanto al uso de dióxido de titanio como del agente oxidante y su actividad conjunta dentro del proceso.

Comparando los ensayos donde se usó únicamente peróxido de hidrógeno con los que se utilizaron sólo el dióxido de titanio, es mejor emplear sólo dióxido de titanio ya que los porcentajes de degradación alcanzados son mucho mayores. Esto se debe a que a partir del dióxido de titanio se forman radicales libres hidroxilos que son más poderosos como agentes oxidantes que el peróxido de hidrógeno. Todo esto gracias a que el peróxido de hidrógeno, en presencia de luz solar, sólo actúa como agente oxidante porque necesita longitudes de onda menores a 290 nm para poder generar radicales hidroxilos.

Comparando el uso de sólo dióxido de titanio, sólo peróxido de hidrógeno y fotocatalisis heterogénea con $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$, el uso de este último fue mejor, debido a que a partir del peróxido de hidrógeno se forma más fácilmente los radicales hidroxilo, que a partir del agua.

A pesar de que el colorante Rojo Amaranto es muy fotoestable, el uso de sólo peróxido de hidrógeno facilita su degradación en altos porcentajes, posibilitando así la disminución en los costos

del tratamiento a través de esta tecnología ya que no será necesario utilizar dióxido de titanio. Claro está que si se quieren incrementar los porcentajes de degradación, el uso del TiO_2 es indispensable.

Referencias

1. MARIN S., Juan M. fotodegradación sensibilizada con TiO_2 y Fe^{3+} de los pesticidas malation y metomil en aguas. Medellín, 2002, 96 p. Trabajo de grado. (Maestría en ingeniería ambiental). Universidad de Antioquía. Facultad de Ingeniería.
2. GARCES GIRALDO, Luis F. Fotocatalisis con TiO_2 de los colorantes azul de metileno y naranja reactivo 84 utilizando colector solar. Medellín, 2003; 208 p. Tesis de maestría (Ingeniería Ambiental). Universidad de Antioquía. Facultad de ingeniería.
3. PEÑUELA M., Gustavo A. fotólisis y fotodegradación sensibilizada con Fe^{3+} y TiO_2 de pesticidas en aguas naturales. Barcelona, 1998; 149 p. Tesis de doctorado (Química analítica del medio ambiente y la polución). Universidad de Barcelona. Departamento de Química Analítica.
4. CORREA JARAMILLO, Nelson A. fotodegradación de cianuros mediante Fotocatalisis heterogénea con TiO_2 utilizando colector solar y lampara de luz ultravioleta. Medellín, 2004; 105 p. Tesis de maestría (Ingeniería ambiental). Universidad de Antioquía. Facultad de ingeniería.