

# Cinética de degradación y mineralización del colorante Rojo Amaranto por medio de la fotocatalisis con luz solar \*

Luis Fernando Garcés Giraldo<sup>1</sup>/ Edwin Alejandro Mejía Franco <sup>2</sup>/  
Gustavo Antonio Peñuela Mesa<sup>3</sup>

Línea de investigación: Tratamiento de Aguas. Grupo de Investigación Aplicada en Medio Ambiente GAMA y Semillero de investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA.

**Kinetics of degradation and mineralization of the Amaranth Red dye by using sunlight photocatalysis**

## Resumen:

**Introducción:** La oxidación sensibilizada, con  $\text{TiO}_2$  y luz solar, es una técnica que puede ser empleada como sistema de depuración de aguas, especialmente en el tratamiento para tratar residuos líquidos industriales en los que el contenido de compuestos tóxicos sintéticos, son difíciles de eliminar por otras técnicas convencionales. **Objetivo:** Determinar la cinética de degradación y mineralización del colorante rojo amaranto presente en aguas, durante el proceso de fotocatalisis con dióxido de titanio utilizando un colector solar cilindro parabólico. **Materiales y métodos:** para determinar la cinética de degradación y mineralización del colorante rojo amaranto durante la fotocatalisis, se comprobó el orden de la reacción para cada uno de los experimentos realizados, considerando tanto las concentraciones de color y COT residuales; para, posteriormente, determinar las constantes de velocidad y los tiempos de vida media de color presente en el agua después de las 8 horas de tratamiento. **Resultados:** Considerando cada una de las condiciones de los experimentos el parámetro que más influyó sobre los tiempos de vida media del colorante, es el uso de  $\text{TiO}_2$  conjuntamente con peróxido de hidrogeno. El menor tiempo de exposición a la luz solar en el que se logro la disminución del 50% del color (tiempo de vida media) fue de 1.92 horas, para la condición en la que se emplearon 150 mg/L de  $\text{TiO}_2$  y 2

ml/L de peróxido de hidrógeno, condición bajo la cual al final del tratamiento se logró una degradación del 93.48% en promedio. **Conclusión:** el empleo de las cantidades y concentraciones adecuadas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  permite que el tratamiento de aguas coloreadas mediante fotocatalisis, requiera de tiempos inferiores a las 8 horas de radiación solar para degradar el color presente en el agua en un alto porcentaje.

**Palabras clave:** Cinética de degradación. Cinética de mineralización. Oxidación sensibilizada. Fotodegradación. Tiempo de vida media. Constante de velocidad. Dióxido de titanio. Peróxido de hidrógeno. Colorante. Radiación solar.

## Abstract

**Introduction:** Oxidation sensitized with  $\text{TiO}_2$  and sunlight, is a technique that can be used as a water purification system, especially on the treatment of liquid industrial wastes in which the content of synthetic toxic compounds are difficult to be eliminated by other conventional ways. **Objective:** To determine the kinetics of degradation and mineralization of the amaranth red dye contained in water during the photocatalysis process with titanium dioxide, using a parabolic cylinder sunlight collector. **Materials and Methods:** To determine the kinetics of degradation and mineralization of the

\* 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

<sup>1</sup> Ingeniero Sanitario, magíster en Ingeniería Ambiental, especialista en Cuencas Hidrográficas, y especialista en Ingeniería Ambiental. Decano Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista. Director del Grupo de Investigación Aplicada en Medio Ambiente GAMA/ <sup>2</sup> Ingeniero Ambiental, Corporación Universitaria Lasallista / <sup>3</sup> Químico. Doctor en Química Ambiental. Director del GIGA, Universidad de Antioquia.

Correspondencia: Luis Fernando Garcés Giraldo. e-mail: [lugarces@lasallista.edu.co](mailto:lugarces@lasallista.edu.co)

Fecha de recibo: 27/06/2005; fecha de aprobación: 19/07/2005

amaranth red dye during photocatalysis, we proved the order of the reaction for each one of the experiments made, considering the color concentrations and residual COT in order to determine, afterwards, the constant rates of velocity and the mid-life times of the color contained in water after 8 hours of treatment. **Results:** Considering each of the conditions of the experiments, the most influential parameter on the times of the dye's mid life is the use of TiO<sub>2</sub>, along with hydrogen peroxide. The shortest exposition to sunlight in which a 50% diminishing of the color was made (time of midlife) was 1.92 hours, for the condition in which 150mg/L

of TiO<sub>2</sub> and 2 ml/L of hydrogen peroxide were used. Under this condition a media rate of degradation of 93.48% was reached. **Conclusion:** The use of the adequate quantities and concentrations of TiO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> allows the treatment of dyed waters taking time periods lower than 8 hours of sunlight to degrade the color contained, in a high percentage, in water.

**Key words:** Kinetcs of degradation. Kinetics of mineralization. Sensitized oxidation. Photodegradation. Midlife time. Speed constant rate. Titanium dioxyde. Hydrogen peroxyde. Dye. Sunlight.

---

## Introducción

Se ha comprobado que la velocidad de un gran número de reacciones está afectada por la presencia de sustancias que no son los reactivos originales ni los productos finales de la reacción. Estas sustancias, llamadas catalizadores, pueden retardar las reacciones, en cuyo caso se denominan catalizadores negativos, o aumentar su velocidad, llamándose catalizadores positivos. Los catalizadores o semiconductores pueden ser sólidos o líquidos. Las reacciones catalizadas por sólidos, generalmente, implican rupturas o uniones de alta energía y juegan un papel importante en muchos procesos, como por ejemplo, en el tratamiento de las aguas residuales mediante fotocátalisis.<sup>1,2</sup>

Aunque frecuentemente un catalizador puede hacer variar la velocidad de las reacciones, también se encuentra, para muchas reacciones, que la característica mas importante de un catalizador es su selectividad. Entendida esta como la propiedad que le permite al catalizador modificar solamente la velocidad de ciertas reacciones sin afectar los posibles productos de estas, todos los factores que influyen sobre ella y explicando la magnitud.<sup>1,2</sup>

La cinética química hace referencia a la rapidez o velocidad de las reacciones que se llevan a cabo dentro de determinado proceso, muchas reacciones tienen velocidades que a unas condiciones dadas son proporcionales a la concentración de uno o más reactivos, como es el caso de la degradación y mineralización del colorante Rojo Amaranto, en la que la disminución de estas va-

riables puede depender del uso del dióxido de titanio y/o del peróxido de hidrógeno.<sup>3-6</sup>

## Materiales y métodos

El colector solar utilizado 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, para garantizar una mayor reflectancia de la radiación ultravioleta de la luz solar, el sistema cuenta con una bomba de recirculación y un tanque; la ubicación de este es 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.



**Foto1. Colector solar cilindro parabólico empleado para tratar el agua coloreada con el colorante rojo amaranto.**

Todas las reacciones que se dan por efecto de la radiación solar tienen gran interés para el medio ambiente, como es el caso de las reacciones de fotólisis, para que éstas ocurran es necesario que el compuesto químico absorba la longitud de onda de la radiación solar, por encima de los 290 nm.<sup>7,8</sup>

La velocidad de fotólisis está en función de los fotones absorbidos a determinada longitud de onda y está dada por la ecuación 1:<sup>2,3,4</sup>

$$v\lambda = I_{a\lambda} \phi\lambda \quad \text{Ecuación 1}$$

La intensidad de la luz absorbida a determinada longitud de onda depende del coeficiente de absortividad molar ( $\epsilon$ ) y de la concentración del compuesto químico  $[C]$ :<sup>3,4</sup>

$$I_{a\lambda} = I_{0\lambda}(1-10^{-\epsilon[C]}) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde ( $l$ ) es la distancia recorrida por la radiación en la columna de agua para alcanzar el compuesto químico. Por lo tanto, la velocidad de fotólisis en función de la longitud de onda ( $l$ ) viene dada por:<sup>4</sup>

$$v\lambda = I_0\lambda(1-10^{-\epsilon[C]}) \phi\lambda \quad \text{Ecuación 3}$$

Luego, la velocidad total de fotólisis directa se obtiene integrando el intervalo en el cual se absorbe el compuesto químico:<sup>3</sup>

$$d[C] / dt = \int \lambda k\lambda [C] \quad \text{Ecuación 4}$$

Además, de las reacciones de fotólisis en las aguas naturales, también se llevan a cabo fotodegradaciones sensibilizadas debido a la presencia de compuestos o iones naturales como nitratos, nitritos, ácidos húmicos entre otros que aceleran la degradación de los compuestos.

En los estudios cinéticos de degradación, el tiempo de vida media es el que indica la estabilidad del compuesto a través del tiempo. En las foto degradaciones con luz solar, la comparación del tiempo de vida media con otros indicados en la literatura, debe hacerse con cuidado, ya que como se ha mencionado anteriormente este varía con las estaciones del año, hora, altitud, etc.<sup>3,4</sup>

El tiempo de vida media, se determina con las ecuaciones 6 y 9 dependiendo del orden de reacción de la fotodegradación, el orden de la reac-

ción se determina mirando en cual de estas dos ecuaciones, la gráfica se ajusta a una línea recta, y de dichas gráficas se calcula la constante de velocidad. Las gráficas son: logaritmo de la concentración residual vs. Tiempo de radiación solar y 1/concentración residual vs. Tiempo de radiación. Si el orden de la reacción es uno, la ecuación 6 después de la integración queda así:<sup>2,4</sup>

$$-(\ln [C] - \ln [C_0]) = kt \quad \text{Ecuación 5}$$

Que expresada en logaritmos decimales queda:

$$\log [C] = - (k/2.303)t + \log [C_0] \quad \text{Ecuación 6}$$

De donde se puede determinar el tiempo de vida media:

$$t_{1/2} = 0.693/K \quad \text{Ecuación 7}$$

En el que  $K$  (constante de velocidad) se puede determinar multiplicando la pendiente de las gráficas por  $-2.303$ .

Si el orden de la reacción es 2, la ecuación después de la integración queda:

$$1/[C] - 1/[C_0] = kt \quad \text{Ecuación 8}$$

donde se puede determinar el tiempo de vida media como:

$$t_{1/2} = 1/k[C_0] \quad \text{Ecuación 9}$$

Para determinar la cinética química del colorante Rojo Amaranto durante el proceso de fotocatalisis es indispensable determinar el orden de las reacciones para cada uno de los experimentos que se realizaron (Tabla 1), la cual se determina mediante la representación gráfica del logaritmo de la concentración vs. tiempo acumulado de radiación al igual que 1/concentración residual del colorante vs. tiempo, las cuales representan reacciones de primer y segundo orden respectivamente. Dicha determinación se realizó haciendo un seguimiento a la trayectoria de los resultados promedios totales registrados para cada ensayo considerando los anteriores parámetros. Si la tendencia de los puntos registrados se aproxima a una línea recta el orden de la reacción es uno mientras que por el contrario las de trayectorias no muy lineales no lo son.<sup>2,6,7</sup>

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

Experimento		Concentración Colorante (mg/l)	Concentración de TiO <sub>2</sub> (mg/L)	Cantidad de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)
Nº	Descripción			
E1	Oxidación	100	0	1
E2	Con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .	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

## Resultados y discusión

Con relación a la presente investigación, se puede decir que la mayoría de reacciones llevadas a cabo en los ensayos fueron de primer orden. Pero como algunas reacciones mostraron gráficas con un comportamiento no lineal, estando muy aleja-

das de ser reacciones de segundo orden (2), se llegó a la conclusión que éstas fueron de pseudo-primer orden (s-1) (tablas 2 y 3). Las reacciones de primer orden dependen de la constante de degradación de color mientras, que las de pseudoprimer orden dependen de esta misma variable y de la constante del peróxido de hidrógeno pero en menor medida.

**Tabla 2. Orden de reacción, constante de velocidad y tiempo de vida media de la degradación del colorante rojo Amaranto para cada uno de los ensayos realizados.**

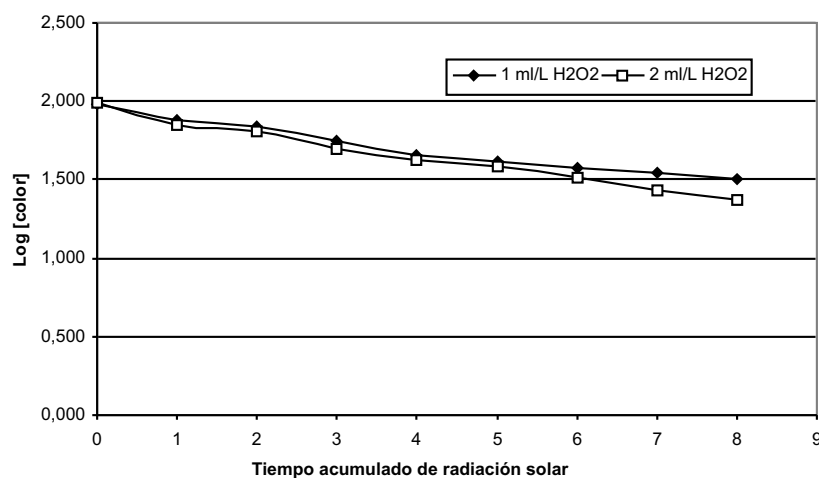
Ensayo	Orden de reacción	Constante de velocidad (h <sup>-1</sup> )	Correlación	Tiempo de vida media (h)	% degradación
E1	1	0.13680	0.9672	5.07	67.29
E2	1	0.16904	0.9864	4.10	76.50
E3	S-1	0.04974	0.9242	13.93	34.35
E4	1	0.21925	0.9808	3.16	80.00
E5	S-1	0.27935	0.9796	2.48	86.81
E6	1	0.13196	0.9660	5.25	60.07
E7	S-1	0.29202	0.9849	2.37	88.74
E8	S-1	0.24573	0.9803	2.82	87.47
E9	1	0.17733	0.9917	3.91	73.84
E10	1	0.24895	0.9847	2.78	83.97
E11	1	0.36157	0.9866	1.92	93.49
E12	S-1	0.02925	0.9570	23.69	17.49
E13	1	0.17572	0.9590	3.94	76.76
E14	1	0.13104	0.8002	5.29	70.09

**Tabla 3. Orden de reacción, constante de velocidad y tiempo de vida media para la mineralización (COT mg/L) del colorante rojo Amaranto utilizando colector solar.**

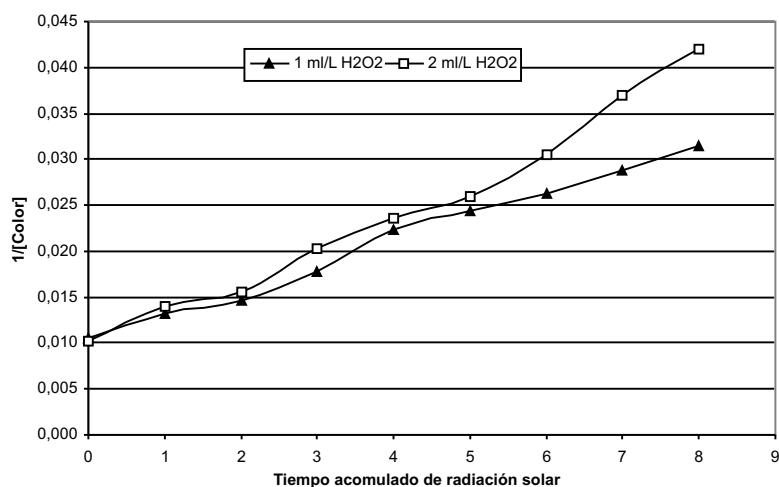
Ensayo	Orden de reacción	Constante de velocidad (h <sup>-1</sup> )	Correlación	Tiempo de vida media T <sub>35%</sub> (h)	% mineralización
E1	1	0.0193	0.9969	35.82	13.0
E2	1	0.0246	0.9949	28.12	19.90
E3	S-1	0.0067	0.8735	103.76	5.13
E4	S-1	0.0304	0.9238	22.80	24.22
E5	1	0.0405	0.9838	17.10	25.91
E6	S-1	0.0117	0.9383	59.00	9.14
E7	S-1	0.0389	0.9621	17.81	27.00
E8	1	0.0290	0.9988	23.88	20.71
E9	1	0.0021	0.9935	334.35	16.44
E10	S-1	0.0410	0.9553	16.91	26.61
E11	S-1	0.0527	0.9674	13.14	39.48
E12	S-1	0.0071	0.7902	97.07	4.04
E13	S-1	0.0251	0.9438	27.61	17.36
E14	S-1	0.0099	0.9827	69.98	7.95

**Cinética de degradación de la oxidación con peróxido de hidrógeno.** De acuerdo al orden de reacción, en los ensayos que solo se empleó peróxido de hidrógeno en dosis de 1 y 2 ml/L (tabla 1), la mejor linealidad se presentó para la gráfica Log [color] vs. Tiempo en horas (gráfica 1), mostrando tiempos de degradación media de 5.07 y 4.10 horas, estableciendo entre estos sólo una diferencia de 0.97 horas para alcanzar la degradación media del colorante en

comparación con la grafica 1/concentración de color (gráfica 2). Criterio bajo el cual se llegó a la conclusión de que las reacciones para los ensayos E1 y E2 eran de primer orden. Para dichos experimentos las ecuaciones con sus respectivos coeficientes de correlación fueron:  $\log [\text{color}]_1 = -0.0594(t) + 1.9408$  con  $R^2 = 0.9672$  para una dosis de 1 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y  $\log [\text{color}]_2 = -0.0734(t) + 1.9469$  con  $R^2 = 0.9864$  para una dosis de 2 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.



**Gráfica 1. Logaritmo de la concentración residual del colorante Rojo Amaranto vs. tiempo acumulado de radiación con luz solar, con 1 y 2 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (E1 y E2).**



**Gráfica 2. Concentración residual del colorante rojo Amaranto vs. tiempo acumulado de radiación con luz solar, con 1 y 2 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (E1 y E2).**

**Cinética de degradación de la Fotocatálisis heterogénea.** Para la cinética de degradación, según los datos de la tabla 2, la reacción de degradación del colorante rojo Amaranto cuando se realizó fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio utilizando peróxido de hidrógeno como fuente de radicales hidroxilos libres adicionales en el colector solar, fue mayor en el ensayo que se empleó 150 mg/L TiO<sub>2</sub> y 2 ml/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ensayo 11 (E11), seguida del ensayo en que se empleó 50 mg/L TiO<sub>2</sub> y 2 ml/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ensayo 5 (E5). Por consiguiente, en estos ensayos fue donde se dieron los mayores porcentajes de degradación 93.48 y 86.81% respectivamente.

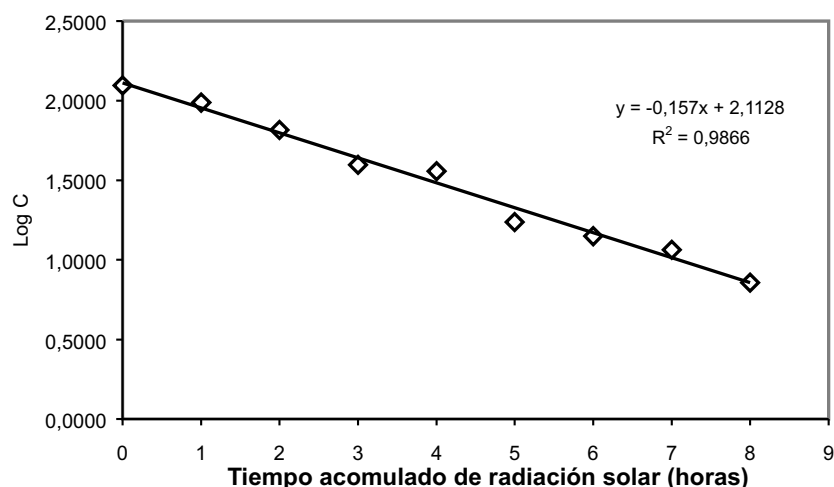
Según los resultados de degradación y las cinéticas de degradación del colorante rojo Amaranto (tabla 2), se puede afirmar que hay una relación directamente proporcional entre el porcentaje de degradación y la velocidad (constantes de velocidad) a las cuales se dieron estas en cada ensayo. Es decir, cuanto mayor fue la degradación del colorante, las reacciones se llevaban a cabo más rápidamente logrando degradaciones del 50% del colorante en el menor tiempo de exposición a la radiación solar (tiempo de vida media).

Las mayores remociones de color, y velocidades de degradación a los menores tiempos de exposición a radiación solar, se lograron con

aquellas dosis en las que se empleaban peróxido de hidrógeno como agente oxidante. Logrando alcanzar óptimos resultados a concentraciones bajas como la del ensayo 5 (E5) (tabla 2), con excepción de los ensayos en los que se usaron dosis de 30 mg/L de TiO<sub>2</sub> con las respectivas combinaciones de peróxido de hidrógeno (E12, E13 y E14), en el que la dosis empleada no era suficiente para obtener buenas degradaciones, ya que, la formación de radicales libres no eran suficientes para degradar el color presente el agua.

Los resultados presentados en la tabla 2, muestran que la velocidad de degradación máxima aumentó al incrementar la dosis del sensibilizador y del agente oxidante, mostrando mayor respuesta en aquellos experimentos en los que se utilizó peróxido de hidrógeno, además puede observarse que dichos incrementos en las constantes de velocidad obedecen más a aquellos experimentos en los que se suministraron ambas cantidades de TiO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en sus máximas dosis (50 100 150 mg/L de TiO<sub>2</sub> cada uno con 2ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

La determinación del orden de la reacción del ensayo que presentó una desaparición del 50% de color en el menor tiempo y por lo tanto el máximo porcentaje de degradación, se deducen de la gráfica 3.



**Gráfica 3. Logaritmo de la concentración residual del colorante rojo Amaranto vs. el tiempo acumulado de radiación con luz solar, ensayo 11 en el que se logró degradar el 50% de color en 1.92 horas (tabla 9).**

**Cinética de mineralización.** Los valores de vida media para la mineralización del colorante Rojo Amaranto, no se presentarán con respecto a la pérdida del 50% de COT (parámetro seleccionado para medir la mineralización), ya que durante el proceso de Fotocatálisis con radiación solar utilizando colector solar, no se dio ni siquiera la desaparición del 50% de este parámetro, por consiguiente los tiempos de vida media se presentarán con base en el máximo porcentaje de mineralización alcanzado el cual fue del 34.99%, para el ensayo 11 (E11) (tabla 3).

En la tabla 3 se muestran los tiempos de vida Media Para la mineralización del colorante rojo Amaranto las constantes de velocidad, en ésta los tiempos en los cuales las reacciones se dieron más rápidamente fueron 17.09, 17.80, 16.90 y 13.14 horas, correspondientes a los ensayos E5, E7, E10 y E11 respectivamente. En los cuales no se presentó una completa mineralización, por lo tanto para que sea eficiente el proceso de mineralización bajo estas condiciones se requieren periodos de radiación solar más largos.

## Conclusiones

El tiempo mínimo necesario para la eliminación del 50% del color presente en el agua mediante la oxidación con peróxido de hidrógeno, fue de 4.10 horas (E2); mientras que en la fotocatálisis

heterogénea el menor sólo le tomó 1.92 horas de radiación solar, reflejándose aquí la importancia de utilizar conjuntamente para este caso  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (E11).

Para lograr disminuir el color en un 50% en el menor tiempo tal como se logra en el ensayo (E11) durante el proceso de fotocatálisis, es absolutamente necesario emplear las cantidades y concentraciones adecuadas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  permitiendo así que el tratamiento de aguas coloreadas mediante fotocatálisis, requiera de tiempos inferiores a las 8 horas de radiación solar para degradar el color presente en el agua en un alto porcentaje.

El porcentaje de degradación y la velocidad de degradación del colorante Rojo Amaranto, cuando se utilizó solamente peróxido de hidrógeno fue mayor en la medida en que se incrementó la cantidad de este; cuando este fue empleado en combinación con dióxido de titanio el porcentaje de degradación y la velocidad de degradación aumentaron en la medida en que se aumentaba la cantidad de estos dos reactivos, logrando así degradar el color en el menor tiempo posible tal como el ensayo (E11). Solo el porcentaje de degradación y la velocidad de reacción disminuyeron en aquellos ensayos en los que las cantidades de catalizador ( $\text{TiO}_2$ ) y agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) eran insuficientes como los ensayos (E12, E13 y E14).

Con la implementación del sistema de fotocátalisis como alternativa para tratar aguas coloreadas con Rojo amaranato, se podría decir con base en los resultados obtenidos que para lograr altos porcentajes en la mineralización del colorante se requieren tiempos de tratamiento superiores a las 8 horas, mientras que para degradar este bastaría con menos del tiempo implementado como es el caso del ensayo (E11), en el que se logro degradar el 50% de color en tan solo 1.92 horas.

## Referencias

1. GARCES GIRALDO, Luis F. MEJIA FRANCO, Edwin A. y SANTAMARÍA ARANGO, Jorge J. La fotocátalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: Revista LASALLISTA de Investigación. Vol. 1, No.1 (Enero-junio 2004); p. 83-92.
2. MEJIA FRANCO, Edwin Alejandro. Fotocatálisis con  $TiO_2$  del colorante rojo amaranato utilizando colector solar. Caldas, 2005; 141 p. Tesis de grado (Ingeniería Ambiental). Corporación Universitaria Lasallista. Facultad de ingeniería.
3. GARCES GIRALDO, Luis F. Fotocatálisis 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.
4. 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.
5. GARCES GIRALDO, Luis F. y PEÑUELA MESA, Gustavo A. Fotocatálisis de aguas residuales de la industria textil utilizando colector solar. En: Revista LASALLISTA de Investigación. Vol.1, No. 1(Enero-Junio 2004); p. 7-14.
6. GARCES GIRALDO, Luis F. MEJIA FRANCO, Edwin A. y PEÑUELA MESA, Gustavo A. Fotocatálisis con  $TiO_2$  del colorante rojo amaranato en aguas. En: Revista LASALLISTA de Investigación. Vol.1, No. 2 (Julio-diciembre 2004); p 9-16.
7. SAWYER, Clair N., MCCARTY, Perry L y PARKIN, Gane F., Química para ingeniería Ambiental. 4 ed. Colombia: Mc Graw Hill; 2000. 713 p.
8. MALATO RODRÍGUEZ, Sixto et al. Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante fotocátalisis solar. Madrid: Ciemat; 2001. 189 p