

# EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EMPLEANDO ENERGÍA SOLAR

## EVALUATION OF PHOTOCATALYTIC TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER USING SOLAR ENERGY

GLORIA MARIA RESTREPO

*Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, gloma@udea.edu.co*

LUIS A. RIOS

*Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, larios@udea.edu.co*

JUAN MIGUEL MARIN

*Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, jmmarin@udea.edu.co*

JUAN FELIPE MONTOYA

*Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, ejfma339@udea.edu.co*

JORGE ARMANDO VELÁSQUEZ

*Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, ejava421@udea.edu.co*

Recibido para revisar Septiembre 18 de 2007, aceptado Febrero 22 de 2008, versión final Marzo 03 de 2008

**RESUMEN:** En este trabajo se evaluó la degradación fotocatalítica de contaminantes acuosos provenientes de una industria de productos químicos, empleando un fotorreactor solar de placas planas de vidrio corrugado dispuestas en forma de cascada, sobre las cuales se soportaron películas de  $\text{TiO}_2$  (Degussa P-25) /  $\text{SiO}_2$ , como sistema fotoactivo. Se estudió la influencia de tres variables en la eficiencia de descontaminación: cantidad de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , volumen de agua a tratar y cantidad de  $\text{TiO}_2$  disperso, mediante un diseño de experimentos llevados a cabo en modo de operación discontinua por un periodo de 5 horas para cada ensayo.

Los resultados obtenidos confirman a la Fotocatálisis Heterogénea (FH) como una tecnología viable de tratamiento en etapas previas a un tratamiento biológico ya que se alcanzaron porcentajes de reducción en la DQO que varían entre 6 y 46% y se obtuvieron efluentes biodegradables en todas las pruebas realizadas.

**PALABRAS CLAVE:** Fotocatálisis Heterogénea, Fotorreactor solar, Procesos Avanzados de Oxidación, Aguas residuales industriales.

**ABSTRACT:** Wastewater of a chemical industry was treated in a photocatalytic process, using a solar photoreactor made of glass corrugated flat plates that had been set in cascade and using Titanium Dioxide (Degussa P-25) as photocatalyst that is supported on each one of them in film form. The influence of three variables in the decontamination efficiency were studied: amount of  $\text{H}_2\text{O}_2$ , volume of water and amount of dispersed  $\text{TiO}_2$ , by means of the accomplishment of fifteen experiments carried out in discontinuous operation mode by a period of 5 hours for each test. The obtained results allow to establish that the FH is a viable technology of treatment like previous stage to a biological treatment since percentage of reduction in the DQO varies between 6 and 46% and was managed to reach a biodegradable effluent in all tests.

**KEYWORDS:** Heterogeneous Photocatalysis, Solar Photoreactor, Advanced Oxidation Processes, Industrial wastewater.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cuidado y la protección de los cuerpos de agua dulce se ha convertido en una tarea de primera línea en la agenda de países y organismos multilaterales como las Naciones Unidas (ONU), por ser una problemática que está directamente relacionada con el desarrollo y la salud humana [1]. En América Latina y el Caribe, región con una población de 497 millones de habitantes, se estima que 77 millones de personas carecen de agua potable, es decir, el 15% de la población total, siendo esta una realidad que se refleja en Colombia, donde también el 15% de su población total carece de suministro de agua [2].

Toda esta problemática ha generado la concepción de una legislación cada vez más estricta en materia de remoción de contaminantes de las aguas residuales producidas por actividades agrícolas e industriales, con el fin de estimular al sector industrial a invertir en tecnologías de tratamiento, que permitan no sólo cumplir con la norma y el ahorro en el pago de multas a la autoridad ambiental, sino también hacer un ciclo de reciclaje de agua de proceso, lo que trae consigo una disminución en los costos de servicios industriales.

La industria química genera contaminantes acuosos de muy diversa índole, lo que ha conducido a la implementación de diversos métodos para la remoción de contaminantes presentes en sus aguas residuales, sin que se logre, en la mayoría de los casos, una solución adecuada al problema debido a que los contaminantes suelen ser recalcitrantes y no biodegradables, a los altos consumos de reactivos químicos y/o energía necesarios, a la formación de subproductos peligrosos, al cambio de fase del contaminante sin su destrucción completa y la selectividad por algunos contaminantes, dejando intacta la estructura química de algunos de ellos; en consecuencia, se hace necesaria la búsqueda de métodos de remoción de compuestos químicos que no presenten estos inconvenientes y que permitan que las aguas contaminadas puedan restaurarse a una condición de reuso, para lo cual es necesario identificar cuál ha sido el daño y que posibilite dar al agua el tratamiento adecuado para la

eliminación de cada una de las características no deseadas según el destino que se pretenda darle.

Las Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAOs) se proponen como una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias antropogénicas difícilmente biodegradables; estas tecnologías involucran la generación y uso de especies transitorias, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ), el anión superóxido ( $\text{O}_2^-$ ) y el electrón solvatado ( $e_{ac}^-$ ), con un alto potencial de oxidación que atacan los contaminantes, transformándolos finalmente en especies inocuas [4-5], o más oxidadas y por ende más susceptibles de ser tratadas utilizando métodos biológicos convencionales. Dentro de las TAOs se destaca la Fotocatálisis Heterogénea (FH) con  $\text{TiO}_2$  por ser una tecnología capaz de oxidar gran cantidad de compuestos refractarios, tener bajos costos de insumos químicos puesto que sólo se utiliza un catalizador ( $\text{TiO}_2$ ) que posee un tiempo de vida alto y es no selectivo lo que le permite tratar mezclas complejas de contaminantes [6]; además, dado que la fuente de energía del proceso fotocatalítico es la radiación UV que puede ser aportada por la luz solar, presenta grandes ventajas en cuanto a costos energéticos se refiere, especialmente en Colombia que recibe uno de los mayores niveles de radiación solar en el mundo, con un promedio de irradiación solar global diaria que oscila alrededor de  $17,5 \text{ MJ/m}^2/\text{dia}$  [7].

Los tratamientos de agua mediante las TAOs presentan costos relativamente más altos que los métodos físicos o biológicos convencionales, por lo que en la mayoría de los casos se hace prohibitivo desde el punto de vista económico su uso como única etapa de tratamiento, pero se impone cada vez con mayor fuerza la tendencia al uso combinado de TAOs y métodos convencionales para la remoción de contaminantes acuosos, ya que esta combinación presenta ventajas como: efecto sinérgico de los métodos biológicos y químicos que se complementan unos a otros, protección del medio de cultivo biológico de sustancias tóxicas gracias al pretratamiento por medio de TAOs, reducción en la dosis de insumos químicos necesarios para el tratamiento y la reducción de costos respecto a tratamientos de una etapa a la

vez que se alcanza la mineralización completa de los contaminantes [8-9].

En este trabajo se estudia el tratamiento solar fotocatalítico de aguas residuales provenientes de una industria de procesos químicos empleando un reactor de placas planas en cascada. La eficiencia del tratamiento se evaluará con las técnicas analíticas DBO y DQO, las cuales permitirán establecer el grado de oxidación de los contaminantes y la biodegradabilidad del efluente después del tratamiento fotocatalítico para diferentes cantidades de catalizador, agente oxidante o volumen de inicial de agua a tratar, lo que permitirá establecer si este tipo de tratamiento es factible como etapa previa a un proceso de tratamiento biológico.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1 Caracterización de las aguas residuales

Las aguas residuales industriales estudiadas provienen de una planta productora y comercializadora de productos químicos localizada en la ciudad de Medellín y son el efluente acuoso de procesos como lavado de reactores, tanques de almacenamiento y otros equipos, además de residuos generados en el proceso de producción (Tabla 1).

**Tabla 1.** Caracterización de aguas industriales a estudiar.

**Table 1.** Characteristics of studied industrial wastewater

| Propiedad  | Valor       |
|------------|-------------|
| pH         | 2.8 -8.4    |
| DQO (mg/L) | 5116 -15283 |
| DBO (mg/L) | 2900 -9192  |

En el estudio se realizó el seguimiento de parámetros de medición de la calidad de agua globales como la DQO y la DBO debido a que estos parámetros permiten conocer de manera general el grado de oxidación de todos los compuestos presentes y el grado en que éstos se pueden tratar mediante métodos biológicos. Con base en estas consideraciones se presentan en la Tabla 1 las principales características del agua a tratar, que varían de acuerdo a las necesidades de

producción de la empresa en un rango como el presentado.

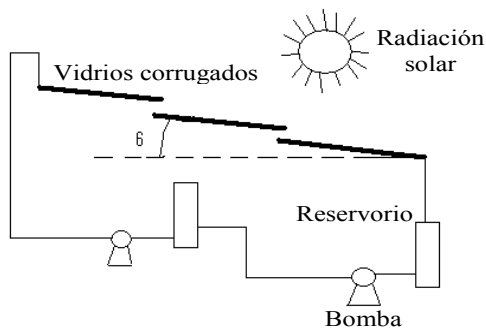
### 2.2 Materiales, equipos y reactivos

Filtros de membrana de 0.45  $\mu\text{m}$  y 47 mm i.d. de Schleicher & Schuell (Dassel, Alemania); Peróxido de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), 30%, Carlo Erba; Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) P-25, Degussa; dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), Carlo Erba; sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ), Merck; sulfato de Mercurio ( $\text{HgSO}_4$ ), Carlo Erba; ácido sulfúrico, 98%, Carlo Erba; agua destilada y desionizada; ftalato de hidrógeno de potasio ( $\text{HOCC}_6\text{H}_4\text{COOK}$ ), Carlo Erba; solución tampón fosfato; sulfato de magnesio, Carlo Erba; cloruro de calcio, Merck; cloruro férrico, Merck; glucosa, Merck; ácido glutámico, Merck; cloruro de amonio, Carlo Erba; Termoreactor, Merck TR-420; Espectrofotómetro, Termo Spectronic, Helios  $\alpha$ ; 2 bombas, 2E-38 N de Little Giant, Oklahoma City (USA); balanza analítica BP 2215 de Sartorius; reservorio plástico de 20 litros marca Estra; equipos de filtración de vidrio con soporte para los filtros de membrana; radiómetro, Optix; fotorreactor de placas en cascada; pHmetro pH 320/set1, WTW.

### 2.3 Sistema de fotodegradación

El sistema de fotodegradación consistió de tres placas de vidrio corrugadas de 0.12  $\text{m}^2$  cada una, sobre las cuales se soportó el  $\text{TiO}_2$  Degussa P-25, empleando la técnica sol-gel combinada con el método *flow coating* para la impregnación, mediante un procedimiento previamente desarrollado [10], de modo que sobre cada placa quedó soportada una película de catalizador con una densidad promedio de 2.79 g  $\text{TiO}_2/\text{m}^2$ . En la Figura 1 se muestra un esquema del sistema donde las placas fueron colocadas sobre un soporte fabricado en fundición gris, que tiene una inclinación de 6 grados con respecto a la horizontal para cada una de las placas, lo que coincide con la latitud de la ciudad de Medellín (Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 06° 12' de latitud Norte). El sistema permite la entrada regulada del agua a tratar de tal manera que ésta se disperse sobre toda la superficie de las placas y descienda formando una capa muy delgada. El agua es recogida al final de la placa

por un sistema de canales y es llevada a los tanques de almacenamiento donde nuevamente es impulsada por medio de dos bombas centrífugas conectadas en serie, a la entrada de la placa soportada.



**Figura 1.** Sistema de Fotodegradación  
**Figure 1.** Photodegradation system

## 2.4 Procedimiento experimental

La intensidad de la radiación solar UV fue medida de modo discreto, correspondiendo al promedio de medida continua durante un minuto, tomando una medida de radiación para cada muestra con el radiómetro orientado en dirección suroeste con un ángulo de inclinación de 6 grados con respecto a la horizontal. Para cada experimento se hizo un muestreo compuesto de las aguas residuales industriales de la planta en un lapso de 10 horas para garantizar el análisis de un efluente representativo de los diferentes procesos productivos en el transcurso de la jornada laboral, tomándose volúmenes de 4, 8 o 12 litros según el experimento a realizarse de acuerdo con la programación de las Tablas 2 y 3. Las aguas residuales industriales se hicieron recircular a una velocidad de 3.3 L/min, entre el reservorio y el fotorreactor mediante dos bombas centrífugas conectadas en serie y los flujos fueron controlados por medio de válvulas y una corriente que regresaba al reservorio sin pasar por el fotorreactor.

En algunos casos, de acuerdo a la programación de los experimentos, se añadió  $H_2O_2$  a intervalos de tiempo de media hora. Estos experimentos fueron realizados en enero de 2006, época en que el sol se encuentra al norte del equinoccio y por lo tanto el sistema fue localizado con dirección

suroeste ( $15^\circ$  suroeste respecto al eje sur) de tal manera que la placa soportada con el catalizador recibiera la mayor radiación UV durante el mayor tiempo posible. Cada hora se tomaron 10 mL de muestra y todas fueron analizadas por triplicado después de cada sección de experimentos por medio de la técnica DQO y la muestra inicial y final fueron analizadas mediante la técnica DBO, siguiendo para la realización de estas técnicas procedimientos estándares [11]; a cada muestra se le realizó corrección por pérdida de volumen causada por la evaporación del agua y en el caso de experimentos con catalizador suspendido se filtraron con membrana de  $0.45 \mu m$  cada una de las muestras.

Se controlaron 3 variables que permitieron conocer las condiciones óptimas del reactor para obtener altos porcentajes de descontaminación y realizar el escalamiento del reactor a nivel industrial. Las variables escogidas para el estudio fueron:

- X1: Dosis de  $H_2O_2$  (ml/L)
- X2: Volumen de solución a tratar (L)
- X3: Cantidad de  $TiO_2$  (mg/L)

Para el estudio de estas variables se realizaron una serie de experimentos donde la variable de respuesta fue el porcentaje de degradación medido como el porcentaje de reducción en la DQO.

En las Tablas 2 y 3 se definen los valores de las variables estudiadas y la planeación experimental de acuerdo con el modelo Box – Behnken respectivamente. Los valores de la variable X1 se establecieron teniendo en cuenta los costos de este reactivo, ya que suministrar una cantidad mayor a 2 ml/L incrementa dramáticamente los costos totales del tratamiento, por lo que éste valor se toma como el límite superior de dicha variable.

**Tabla 2.** Valores de las variables  
**Table 2.** Variables values

| Valor | X1 | X2 | X3  |
|-------|----|----|-----|
| -1    | 0  | 4  | 0   |
| 0     | 1  | 8  | 100 |
| +1    | 2  | 12 | 200 |

**Tabla 3.** Planeación experimental Box – Behnken  
**Table 3.** Box – Behnken experimental planning

| Número de experimentos | Valor de las Variables |           |    |
|------------------------|------------------------|-----------|----|
|                        | X1                     | X2        | X3 |
| 1                      | -1                     | -1        | 0  |
| 1                      | +1                     | -1        | 0  |
| 1                      | -1                     | +1        | 0  |
| 1                      | +1                     | +1        | 0  |
| 1                      | -1                     | 0         | -1 |
| 1                      | +1                     | 0         | -1 |
| 1                      | -1                     | 0         | +1 |
| 1                      | +1                     | 0         | +1 |
| 1                      | 0                      | -1        | -1 |
| 1                      | 0                      | +1        | -1 |
| 1                      | 0                      | -1        | +1 |
| 1                      | 0                      | +1        | +1 |
| 3                      | 0                      | 0         | 0  |
| <b>TOTAL</b>           |                        | <b>15</b> |    |

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

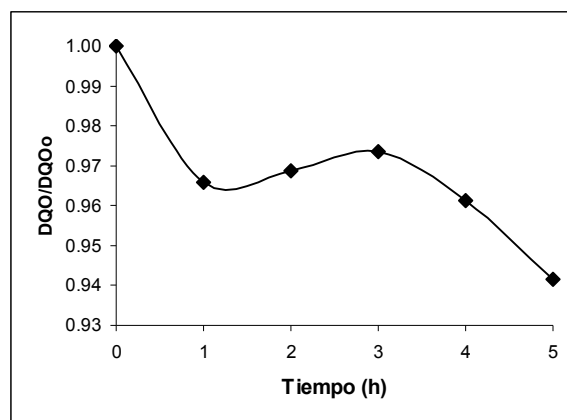
#### 3.1 Experimentos auxiliares

Adicional a los experimentos fotocatalíticos se realizaron 2 experimentos auxiliares que permiten conocer la relevancia de fenómenos como la volatilización y la adsorción del contaminante sobre el catalizador en la eficiencia del proceso. El experimento de volatilización se llevó a cabo sin catalizador soportado sobre las placas y sin radiación solar con el fin de determinar que porcentaje de los contaminantes presentes en las aguas estudiadas se volatilizan, obteniéndose como resultado un porcentaje de volatilización de tan solo 3.91% después de 5 h de recirculación en el fotorreactor, lo que muestra que las aguas estudiadas tienen un bajo contenido de compuestos volátiles, garantizando de este modo que sólo una pequeña proporción de los compuestos contaminantes presentes se evaporan, mientras que el resto se degradan en el proceso fotocatalítico. El experimento de adsorción se llevó a cabo con catalizador soportado sobre las placas y sin radiación solar, dando como resultado una disminución en la DQO de tan sólo 2.07%, lo que muestra que sólo una pequeño porcentaje en la reducción de la DQO se debe a la adsorción de contaminantes sobre la superficie del catalizador.

#### 3.2 Fotólisis

El experimento de fotólisis fue llevado a cabo empleando las mismas condiciones experimentales que en los experimentos de FH.

La degradación de contaminantes mediante fotólisis es de 5.85% y su comportamiento en el tiempo se puede observar en la Figura 2.



**Figura 2.** Experimento de fotólisis

**Figure 2.** Photolysis experiment

El aumento en la DQO observado para los tiempos de 2 y 3 horas puede explicarse teniendo en cuenta las limitaciones de este método analítico para oxidar algunos compuestos altamente estables como los que poseen anillos bencénicos en su estructura [11], que pueden aparecer o desaparecer durante el tratamiento mediante TAOs como posibles productos intermedios del proceso de oxidación de contaminantes [12].

#### 3.3 Experimentos de Fotocatálisis Heterogénea

Los resultados de los experimentos de tratamiento de aguas residuales industriales mediante FH se muestran en la Tabla 4, donde se aprecia que se obtienen porcentajes de degradación entre 6 y 46% de acuerdo con las variables que se emplean en cada experimento. Los valores de radiación promedio que se reportan muestran alta incidencia de radiación solar en el Valle de Aburra.

En general se puede observar de dicha tabla que al aumentar el volumen de agua a tratar disminuye el porcentaje de degradación, hecho que se explica por la disminución en el tiempo efectivo de iluminación debido al aumento en la cantidad de agua que permanece en fase oscura, es decir, en el reservorio. También se puede observar que al aumentar la cantidad de peróxido

de hidrógeno se incrementa el porcentaje de degradación, comportamiento que se debe al papel que cumple este reactivo como agente oxidante en la captura huecos positivos, el cual junto con el oxígeno disuelto en el agua contribuyen a retardar la recombinación del par electrón hueco y a las reacciones que se producen en la banda de valencia.

Los experimentos E2, E6 y E11 proporcionan el máximo porcentaje de degradación para diferentes volúmenes de agua residual y muestran que a medida que aumenta el volumen de agua a tratar disminuye el porcentaje de degradación final que se puede alcanzar mediante tratamiento fotocatalítico. En todos estos experimentos la dosis de peróxido de hidrógeno empleada fue la máxima, lo que demuestra nuevamente que la adición de este reactivo mejora la eficiencia en la oxidación de

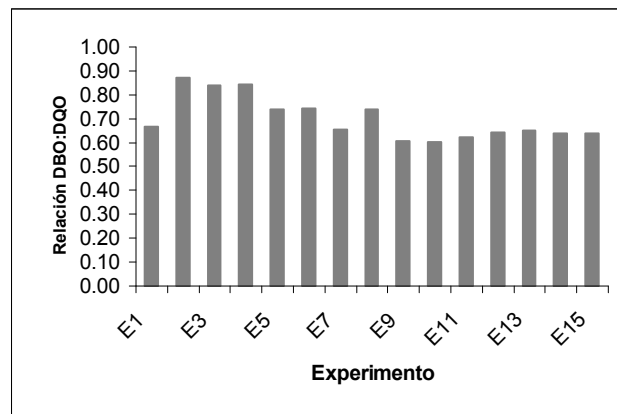
contaminantes a través de FH.

Este comportamiento también fue observado en los experimentos E1, E8 y E10 aunque todos ellos fueron llevados a cabo sin adicionar peróxido de hidrógeno y como resultado presentaron la mínima degradación para cada volumen evaluado, confirmando de esta manera la necesidad de adicionar este agente oxidante para mejorar la eficiencia del proceso de oxidación de esta clase de efluentes empleando FH.

Los valores obtenidos de la relación  $DBO_5:DQO$  al final de todos los experimentos realizados es mayor a 0.5, como se muestra en la Figura 3, encontrándose de esta manera que el efluente final del tratamiento fotocatalítico es biodegradable y por lo tanto es posible implementar esta tecnología como etapa anterior a un tratamiento biológico.

**Tabla 4.** Resultados de experimentos de FH en aguas residuales industriales  
**Table 4.** Experimental results of heterogeneous photocatalysis in industrial wastewater

| Experimento | TiO <sub>2</sub> (mg/L) | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L) | Volumen (L) | Radiación (W/m <sup>2</sup> ) | pH   | Degradación (%) |
|-------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------------|------|-----------------|
| E1          | 100                     | 0                                    | 4           | 36,5                          | 3,85 | 23,52           |
| E2          | 100                     | 2                                    | 4           | 44,5                          | 3,91 | 46,19           |
| E3          | 200                     | 1                                    | 4           | 26,03                         | 3,72 | 43,34           |
| E4          | 0                       | 1                                    | 4           | 31,17                         | 3,99 | 44,11           |
| E5          | 0                       | 0                                    | 8           | 38,33                         | 2,83 | 36,95           |
| E6          | 0                       | 2                                    | 8           | 69,67                         | 3,31 | 38,67           |
| E7          | 100                     | 1                                    | 8           | 40,17                         | 4,24 | 16,8            |
| E8          | 200                     | 0                                    | 8           | 35,41                         | 5,12 | 6,62            |
| E9          | 200                     | 2                                    | 8           | 61,83                         | 5,73 | 31,87           |
| E10         | 100                     | 0                                    | 12          | 18                            | 5,77 | 7,39            |
| E11         | 100                     | 2                                    | 12          | 44,83                         | 5,41 | 33,03           |
| E12         | 200                     | 1                                    | 12          | 52,83                         | 8,43 | 14,8            |
| E13         | 0                       | 1                                    | 12          | 34,83                         | 5,11 | 29,94           |
| E14         | 100                     | 1                                    | 8           | 50,83                         | 4,2  | 19,8            |
| E15         | 100                     | 1                                    | 8           | 34,17                         | 4,12 | 14,84           |



**Figura 3.** Relación  $DBO_5:DQO$  al final del tratamiento fotocatalítico  
**Figure 3.**  $DBO_5:DQO$  ratio after photocatalytic treatment

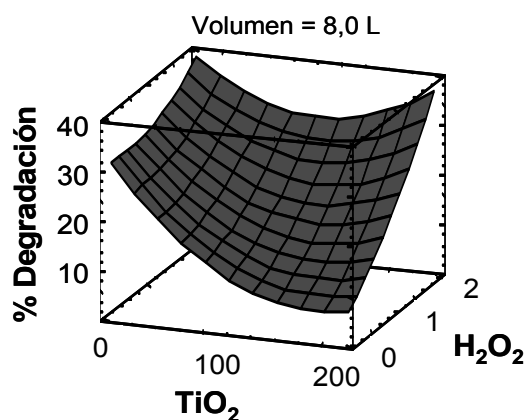
### 3.4 Análisis estadístico de experimentos

Para analizar desde el punto de vista estadístico los resultados obtenidos en los experimentos de FH se empleó el software STATGRAPHICS 4.1, en el cual se introdujo el diseño de experimentos Box-Beckhen, el cual permite encontrar zonas donde el proceso es más robusto, es decir, donde será más manejable ante variables imposibles de controlar como es el caso de la radiación solar. Por otra parte este modelo permite realizar un menor número de experimentos con respecto a otros diseños experimentales, lo que reduce los costos sin sacrificar la precisión y reproducibilidad estadística de los resultados. Del análisis de los datos se obtuvieron datos de varianza, resultados estimados y respuesta óptima (Tablas 5 a 7), además de la superficie de respuesta (Figura 4), que permiten obtener un modelo estadístico que describe el comportamiento del sistema de fotodegradación respecto a las variables experimentales estudiadas y que permitan establecer el grado de confiabilidad de los datos obtenidos. Debe anotarse que los datos de radiación solar promedio no han sido incluidos como variable en este análisis, debido a que sus valores cambian con el tiempo y por tanto no puede controlarse. En la Tabla 5 se puede apreciar que las tres variables estudiadas y dos de sus interacciones tienen un valor P menor a 0.05, lo que indica que éstas afectan de manera significativa la variable de respuesta dentro de un rango de confiabilidad de 95%.

**Tabla 5.** Análisis de varianza  
**Table 5.** Variance analysis

| Parámetro                        | Valor P |
|----------------------------------|---------|
| A: TiO <sub>2</sub>              | 0,0183  |
| B: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 0,0045  |
| C: Volumen                       | 0,0055  |
| AA                               | 0,0307  |
| AB                               | 0,0831  |
| AC                               | 0,2441  |
| BB                               | 0,3480  |
| BC                               | 0,7959  |
| CC                               | 0,0465  |
| R cuadrado                       | 94,0623 |

Con base en el modelo matemático se construyó la superficie de respuesta mostrada en la Figura 4, de la cual se infiere que la adición de peróxido de hidrógeno aumenta el porcentaje de degradación, mientras que la adición de TiO<sub>2</sub> en cantidades de 0 a 150 mg/L disminuye el porcentaje de degradación y en cantidades superiores lo aumenta.



**Figura 4.** Superficie de respuesta Estimada  
**Figure 4.** Estimated Response Surface

Al emplear los valores de las variables estudiadas con sus respectivos niveles para simular matemáticamente el comportamiento de la variable de respuesta, se obtienen datos muy aproximados a los obtenidos experimentalmente, como se muestra en la Tabla 6.

El valor máximo de porcentaje de degradación que se puede obtener según el modelo matemático ajustado es de 56,41% y se obtiene al utilizar los valores de las variables mostrados en la Tabla 7.

De lo anterior se infiere que el modelo estadístico obtenido permite predecir la eficiencia en la remoción de contaminantes mediante tratamiento fotocatalítico para este tipo particular de reactor, lo que posibilita el ajuste de los parámetros de operación (volumen, agente

oxidante y cantidad de TiO<sub>2</sub>) en valores que permitan obtener los porcentajes de remoción deseados, de modo que se obtenga un efluente final con las características de calidad de agua propicias para el tratamiento biológico posterior.

**Tabla 6.** Valores simulados y experimentales para porcentaje de degradación  
**Table 6.** Simulated and experimental values for percent of degradation

| Experimento | % Degradación obtenido experimentalmente | % Degradación obtenido por simulación | % de desviación |
|-------------|--|---------------------------------------|-----------------|
| E1          | 23,52                                    | 27,87                                 | 4,35            |
| E2          | 46,19                                    | 45,20                                 | -0,99           |
| E3          | 43,34                                    | 39,01                                 | -4,33           |
| E4          | 44,11                                    | 45,09                                 | 0,98            |
| E5          | 36,95                                    | 31,63                                 | -5,32           |
| E6          | 38,67                                    | 38,69                                 | 0,02            |
| E7          | 16,80                                    | 17,15                                 | 0,35            |
| E8          | 6,62                                     | 6,61                                  | -0,01           |
| E9          | 31,87                                    | 37,19                                 | 5,32            |
| E10         | 7,39                                     | 8,38                                  | 0,99            |
| E11         | 33,03                                    | 28,69                                 | -4,34           |
| E12         | 14,8                                     | 13,83                                 | -0,97           |
| E13         | 29,94                                    | 34,27                                 | 4,33            |
| E14         | 19,8                                     | 17,15                                 | -2,65           |
| E15         | 14,84                                    | 17,15                                 | 2,31            |

**Tabla 7.** Valores óptimos de las variables según el modelo ajustado

**Table 7.** Optimal values for variables obtained from the adjust model

| Variable                      | Valor óptimo que maximiza el % de degradación |
|-------------------------------|---|
| TiO <sub>2</sub>              | 200   |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 2   |
| Volumen                       | 4,012   |

#### 4. CONCLUSIONES

Los valores promedio de radiación solar medidos durante el desarrollo de los experimentos demuestran que el Valle de Aburra es una zona adecuada para la aplicación TAOs fotoquímicas, las cuales aprovechan una fuente de energía gratuita y abundante en la zona como lo es la radiación solar.

El tratamiento fotocatalítico de aguas residuales industriales evaluadas permitió alcanzar porcentajes de degradación en la DQO comprendidos entre un 6 y 45% dependiendo de los valores de las variables que se emplean en cada uno de los experimentos.

La presencia del proceso secundario de volatilización de contaminantes no influye de manera significativa en el proceso fotocatalítico como lo demuestra el hecho de que este proceso por si solo disminuye en menos de un 4% la DQO de las aguas industriales estudiadas.

El uso del catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 acelera el proceso de oxidación de contaminantes presentes en las aguas residuales industriales estudiadas, hecho que puede comprobarse por la mejora en la eficiencia del proceso de degradación de los contaminantes al emplear la tecnología de FH respecto a la tecnología de fotólisis donde sólo se obtiene un porcentaje de degradación de tan sólo 5.85%.

La adición de peróxido de hidrógeno contribuye a mejorar la eficiencia del proceso de oxidación de los contaminantes, como lo demuestran los experimentos que proporcionan máxima y mínima degradación, el gráfico de superficie de respuesta y la tabla de valores óptimos de las variables.

Se obtuvo un modelo matemático con una confiabilidad del 94% para explicar la variabilidad del porcentaje de degradación respecto a los factores experimentales escogidos para este estudio. El modelo matemático es robusto frente a variables no controladas como radiación solar, pH y concentración inicial de contaminantes, resultado que se esperaba al elegir el diseño experimental Box-Behnken.

La relación DBO<sub>5</sub>:DQO siempre mayor a 0.5 obtenida al final de todos los experimentos de FH muestran que es posible implementar esta tecnología como etapa de pretratamiento del agua residual industrial para acoplamiento posterior con un tratamiento biológico.



## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS y a la UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA por la financiación del proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] UNESCO. Water for people, water for lives – UN World Water Development Report. Paris, 2004.
- [2] CIRELLI, A.F. Y PORTIER, C. Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica, En: Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Solar Safe Water, 11-26, 2005.
- [3] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Normatividad Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/juridica\\_normatividad/normatividad/viceministerio\\_ambiente/agua\\_potable\\_saneamiento/agua\\_pot\\_alcantarillado/Dec\\_1594\\_1984.pdf](http://www.minambiente.gov.co/juridica_normatividad/normatividad/viceministerio_ambiente/agua_potable_saneamiento/agua_pot_alcantarillado/Dec_1594_1984.pdf).
- [4] MATTHEWS, R. Kinetics of Photocatalytic Oxidation of Organic solutes over Titanium Dioxide, Journal of Catalysis, 111, 264-272, 1987.
- [5] DOMÉNECH X., JARDIM W.F. Y LITTER M. Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes, En: Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. Editor: Miguel Blesa, Red CYTED VIII-G, 3 – 26, 2001.
- [6] CANDAL, R., BILMES, S. Y BLESAS, M. Semiconductores con Actividad Fotocatalítica, En: Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. Editor: Miguel Blesa, Red CYTED VIII-G, 79-101, 2001.
- [7] GROSSA, H. Disponibilidad y características de la radiación solar en Sudamérica, En: Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Solar Safe Water, 85-92, 2005.
- [8] SCOTT, J.P. Y OLLIS, D.F. Integration of Chemical and Biological Oxidation Processes for Water Treatment: Review and Recommendations, Environmental Progress, 14 (2), 88 – 103, 1995.
- [9] ESPLUGAS, S. Y OLLIS, D.F. Economical Aspects of Integrated (Chemical + Biological) Processes for Water Treatment, Journal of Advanced Oxidation Technologies, 4 (2), 197 – 202, 1997.
- [10] MARIN, J.M.; MONTOYA, J.F.; MONSALVE, E.; GRANDA, C.F.; RIOS, L.A.; RESTREPO, G.M. Degradación de Naranja de Metilo en un Nuevo Fotorreactor Solar de Placa Plana con Superficie Corrugada; Scientia et Technica, XIII (34), 435-440, 2007.
- [11] AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, APHA; AMERICAN WATER ASSOCIATION, AWWA; WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, 1994.
- [12] HERRMANN, J.M. Destrucción de contaminantes orgánicos por Fotocatálisis Heterogénea, En: Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Solar Safe Water, 147-164, 2005.