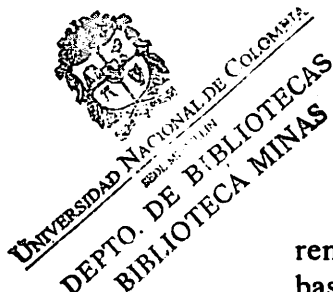


# REMOCIÓN DE DETERGENTES EN MEDIO ACUOSO POR OXIDACIÓN CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO - LUZ ULTRAVIOLETA



ROSAURA CARMONA CORREA<sup>1</sup>  
LILIANA MARÍA RIVERA VÉLEZ<sup>1</sup>  
LUIS HERNANDO GIL VICTORIA<sup>2</sup>  
*Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín  
Facultad de Minas. Departamento de Procesos Químicos*

## RESUMEN

La presente investigación utiliza la combinación peróxido de hidrógeno-luz ultravioleta como un método para remover detergentes. El principio de este método se fundamenta en la producción de los radicales  $\cdot\text{OH}$  capaces de oxidar la materia orgánica.

Para la realización de este trabajo, se utilizaron soluciones sintéticas de detergentes con concentraciones de 10 y 100 ppm, cuyo ingrediente activo es del tipo aniónico por ser estos los detergentes más usados a nivel comercial. Las variables que se seleccionaron para estudiar la eficiencia en la remoción del detergente fueron: el pH inicial, el tiempo de exposición de la mezcla reaccionante a la luz ultravioleta, y la relación molar peróxido de hidrógeno a detergente. Para llevar a cabo los ensayos se seleccionó un diseño experimental central rotacional compuesto.

La máxima eficiencia obtenida fue del 97.3 % para un pH de 6.2, una relación molar oxidante/detergente de 73 y un tiempo de exposición de 15 minutos.

## PALABRAS CLAVES

Oxidación química. Remoción de detergentes. Luz ultravioleta. Peróxido de Hidrógeno.

## ABSTRACT

In this present research the combination of hydrogen peroxide - ultraviolet light is used as a method to

remove detergent. The principle of this method is based in the production of hydroxyl radicals, capables to oxidate the organics material.

In order to perform this work, synthetic solutions of detergent have been used in concentrations of 10 and 100 ppm with an active ingredient from the anionic group, since these detergents are the most used in the market.

The variables that were chosen to find out the efficiency to remove the detergent were as follows: initial pH, time of exposition and molar relation of hydrogen peroxide to the detergent. A central rotative experimental design was selected from which different essays were carried out.

The most efficient remotion obtained was 97.3 % for a pH 6.2, exposition time to a UV light was 15 minutes, and a molar relation hydrogen peroxide to a detergent was 73.

## KEY WORDS:

hydrogen peroxide. remotion of detergent. chemical oxidation. Ultraviolet light.

## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento en el uso diario, de los detergentes sintéticos por los grandes núcleos urbanos y comunidades rurales plantea serios problemas de ingeniería, ya que la descarga de aguas domésticas e

<sup>1</sup>Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín  
<sup>2</sup>Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. A.A 1027 Medellín.  
E-mail: lhgil@perseus.unalmed.edu.co

industriales crea el peligro de la polución de las corrientes de agua. Los problemas que ocasiona la presencia de detergentes sintéticos en el agua, son de diferente naturaleza: interfieren con los tratamientos de potabilización de las aguas, en los tratamientos biológicos y reducen el oxígeno disuelto en las corrientes naturales.

Los distintos procesos de tratamiento físico-químicos que se aplican para la remoción de detergentes como: separación de espuma por flotación [1], coagulación y adsorción, no han logrado altas eficiencias a costo moderado, esto lleva a buscar alternativas en la remoción de detergentes en medio acuoso.

En los últimos años se ha venido implementando el proceso de oxidación química para la remoción de compuestos orgánicos refractarios, algunos de los agentes oxidantes más utilizados son: ozono, dióxido de cloro, permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno. [2], y más recientemente se han venido implementando tratamientos que utilizan la luz UV como fuente activadora de los procesos de oxidación.

## 2. DETERGENTES

El componente básico de los detergentes es el surfactante, que tiene la propiedad de ser un agente activo en soluciones acuosas. [3]

Los surfactantes son de cuatro tipos: aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfotéricos.

Los surfactantes aniónicos son los más utilizados a nivel comercial entre los cuales se destacan: El dodecil bencenosulfonato de sodio ramificado ABS (Figura 1) el cual es extremadamente resistente al ataque microbiano, convirtiéndose en un detergente no biodegradable y el dodecil benceno sulfonato de sodio lineal LAS (Figura 2) sensible a la degradación biológica.

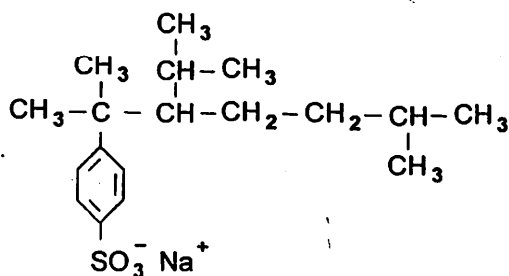


Figura 1. Dodecil benceno sulfonato de sodio ramificado (ABS).

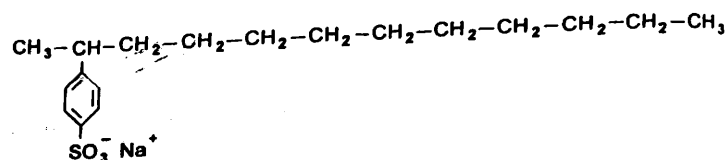


Figura 2. Dodecil benceno sulfonato de sodio Lineal (LAS)

## PROBLEMÁTICA DE LOS DETERGENTES

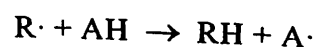
Las dificultades causadas por los detergentes en el proceso de potabilización del agua incluyen: producción de espuma, turbiedad e interferencia con la coagulación y producción de olores y sabores. [4]. La presencia de detergentes en plantas de tratamiento de aguas residuales producen grandes cantidades de espuma que dificultan la aireación de los tanques de lodos activados.

En las corrientes de aguas naturales los detergentes no biodegradables destruyen la capacidad fotosintética de los microorganismos debido a la obstrucción de la luz solar ocasionada por la presencia de espuma, además se produce una reducción del oxígeno disuelto por que se impide la transferencia de oxígeno atmosférico, aumentando la Demanda Biológica de Oxígeno (D.B.O)

## 3. OXIDACIÓN QUÍMICA

La oxidación se clasifica como un tratamiento terciario que es necesario debido a que los tratamientos primarios y secundarios no remueven efectivamente algunos compuestos orgánicos. Investigaciones de los mecanismos y de la cinética de la reacción de oxidación han contribuido a entender el mecanismo de transferencia, y los tipos de intermediarios involucrados en el proceso de oxidación de compuestos orgánicos en tratamiento de aguas y aguas residuales, en el cual la oxidación es una reacción que involucra adición de oxígeno o pérdida de hidrógeno.

La pérdida de hidrógeno está determinada mediante la siguiente ecuación [5]:



Donde :

AH es un compuesto orgánico donador de hidrógenos y  $R\cdot$  es un radical libre que cumple el papel de oxidante.

Algunos de los oxidantes más fuertes y más efectivos son : ozono, permanganato de potasio, dióxido de cloro y más recientemente el peróxido de hidrógeno. Existen algunos aspectos significativos que deben ser considerados en la selección de agentes oxidantes, algunos de ellos son: efectividad del tratamiento, fácil mantenimiento, compatibilidad con etapas de tratamientos precedentes o subsecuentes, costo, naturaleza de la operación de oxidación.

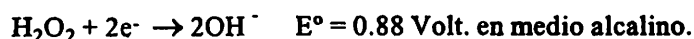
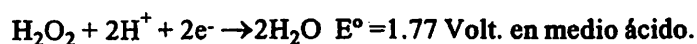
El agente oxidante más efectivo es seleccionado por su capacidad para oxidar cuantitativamente un sustrato determinado a una velocidad considerable. La capacidad de oxidación de un reactivo está generalmente expresada en términos del potencial de oxidación o reducción. En la Tabla 1 se encuentran los potenciales para una variedad de reacciones redox de interés en tratamientos de aguas, referidos al potencial de un electrodo estándar de hidrógeno.

#### PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE.

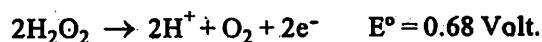
El peróxido de hidrógeno se ha utilizado en el tratamiento de aguas, especialmente para oxidar un gran número de sustancias tóxicas y nocivas, y subproductos de aguas residuales. Además, el peróxido de hidrógeno es una excelente fuente de oxígeno disuelto, el cual es

complementario de la actividad de los organismos aeróbicos de las aguas residuales.

La propiedad del peróxido de hidrógeno como un buen oxidante se deriva de los siguientes potenciales referidos al potencial del electrodo estándar de hidrógeno:



Agente reductor:



El peróxido de hidrógeno posee una gran ventaja ya que sus productos de oxidación son el  $O_2$  y el  $H_2O$ , por lo tanto, su utilización no contribuye de ninguna forma a la polución.

#### 4. OXIDACIÓN FOTOQUÍMICA

Los sistemas fotoquímicos proporcionan energía en forma de luz para controlar la velocidad de reacción de los compuestos. Esta energía se distribuye selectivamente en los compuestos siendo absorbida por moléculas individuales, las cuales pueden permanecer en un estado de excitación el tiempo suficiente para experimentar reacciones.

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética con longitudes de onda entre 180 y 380 nm. El

Tabla 1. Potenciales de Oxidación

Oxidante	Reacción del Electrodo	Potencial de Oxidación (voltios)
$O_3$	$O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	2.07
$H_2O_2$	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- = 2H_2O$	1.77
HClO	$HClO + H^+ + e^- = 1/2Cl_2 + H_2O$	1.63
$KMnO_4$	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- = 4H_2O + Mn^{2+}$	1.51
$Cl_2$	$Cl_2 + 2e^- = 2Cl^-$	1.36
$ClO_2$	$ClO_3^- + 2H^+ + e^- = ClO_2 + H_2O$	1.15

Donde :

AH es un compuesto orgánico donador de hidrógenos y R· es un radical libre que cumple el papel de oxidante.

Algunos de los oxidantes más fuertes y más efectivos son : ozono, permanganato de potasio, dióxido de cloro y más recientemente el peróxido de hidrógeno. Existen algunos aspectos significativos que deben ser considerados en la selección de agentes oxidantes, algunos de ellos son: efectividad del tratamiento, fácil mantenimiento, compatibilidad con etapas de tratamientos precedentes o subsecuentes, costo, naturaleza de la operación de oxidación.

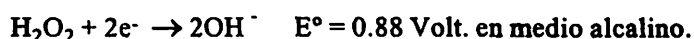
El agente oxidante más efectivo es seleccionado por su capacidad para oxidar cuantitativamente un sustrato determinado a una velocidad considerable. La capacidad de oxidación de un reactivo está generalmente expresada en términos del potencial de oxidación o reducción. En la Tabla 1 se encuentran los potenciales para una variedad de reacciones redox de interés en tratamientos de aguas, referidos al potencial de un electrodo estándar de hidrógeno.

#### PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO AGENTE OXIDANTE.

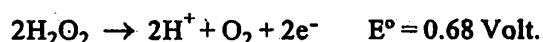
El peróxido de hidrógeno se ha utilizado en el tratamiento de aguas, especialmente para oxidar un gran número de sustancias tóxicas y nocivas, y subproductos de aguas residuales. Además, el peróxido de hidrógeno es una excelente fuente de oxígeno disuelto, el cual es

complementario de la actividad de los organismos aeróbicos de las aguas residuales.

La propiedad del peróxido de hidrógeno como un buen oxidante se deriva de los siguientes potenciales referidos al potencial del electrodo estándar de hidrógeno:



Agente reductor:



El peróxido de hidrógeno posee una gran ventaja ya que sus productos de oxidación son el  $\text{O}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$ , por lo tanto, su utilización no contribuye de ninguna forma a la polución.

#### 4. OXIDACIÓN FOTOQUÍMICA

Los sistemas fotoquímicos proporcionan energía en forma de luz para controlar la velocidad de reacción de los compuestos. Esta energía se distribuye selectivamente en los compuestos siendo absorbida por moléculas individuales, las cuales pueden permanecer en un estado de excitación el tiempo suficiente para experimentar reacciones.

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética con longitudes de onda entre 180 y 380 nm. El

Tabla 1. Potenciales de Oxidación

Oxidante	Reacción del Electrodo	Potencial de Oxidación (voltios)
$\text{O}_3$	$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.07
$\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	1.77
HClO	$\text{HClO} + \text{H}^+ + \text{e}^- = 1/2\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	1.63
$\text{KMnO}_4$	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- = 4\text{H}_2\text{O} + \text{Mn}^{2+}$	1.51
$\text{Cl}_2$	$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{Cl}^-$	1.36
$\text{ClO}_2$	$\text{ClO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{ClO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	1.15

principio fundamental de la fotoquímica determina que "Sólo la luz que se absorbe puede provocar un cambio físico o químico". Es decir, los átomos y las moléculas absorben sólo aquellas longitudes de onda que proporcionan una cantidad exacta de energía para cambiar su estado. [6]

La Tabla 2 presenta la energía de disociación para una variedad de enlaces químicos.

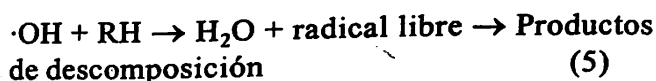
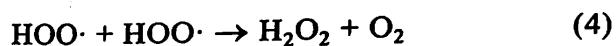
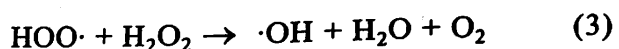
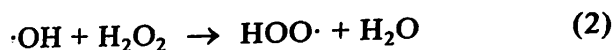
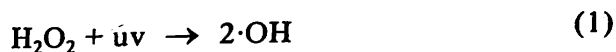
Tabla 2. Energías de Disociación de algunos Enlaces

Enlace	Energía de disociación Kcal / gmol	Longitud de Onda que puede destruir el enlace nm
C-C	82.6	253.7 - 184.9
C-H	98.7	253.7 - 184.9
C-O	85.5	253.7 - 184.9
H-H	104.2	253.7 - 184.9
O-O (O <sub>2</sub> )	119.1	185.9
-O-O-	47.0	253.7 - 184.9
O-H(agua)	117.5	184.9

La eliminación de compuestos orgánicos refractarios se puede llevar a cabo por oxidación fotolítica. Este proceso de oxidación es usualmente muy complejo e involucra intermediarios altamente reactivos como el radical Hidroxil ( $\cdot\text{OH}$ ) con un potencial de oxidación de 2.8 voltios, el cual se forma en el proceso de absorción de la luz. [7, 8, 9]

Para propósitos de purificación de agua, el proceso de foto-oxidación requiere un exceso de radicales hidroxil, esto se logra por la adición de peróxido de hidrógeno al sistema. La irradiación induce al rompimiento del peróxido de hidrógeno en radicales hidroxil y de esta manera acelera el proceso de oxidación.

La producción de radicales hidroxil por fotólisis del peróxido de hidrógeno solo es efectiva a una longitud de onda de 253.7 nm, [2] y está dada mediante un conjunto de reacciones. [10,11]



La Tabla 3 muestra ejemplos de reacciones químicas simples y las transformaciones inducidas por la luz uv a 184.9 nm y 253.7 nm. [12]

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1 EQUIPO

Fotorreactor de acero inoxidable. Marca: Atlantic Ultraviolet Corporation con capacidad máxima: 30 GPD, volumen 650 ml, contiene una lámpara de radiación uv con longitud de onda 254.3 nm, protegida con tubos de cuarzo.

### 5.2 MÉTODO DE ANÁLISIS

La concentración de detergente aniónico se determinó por el método colorimétrico de anaranjado de acridina basado en la formación de un par iónico entre la forma aniónica del tensoactivo y un catión de alto peso molecular [13]

### 5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se seleccionó un diseño central rotacional compuesto, para la obtención de una superficie de respuesta de segundo orden y para analizar las diferentes interacciones entre las variables estudiadas, y se utilizó el programa statgraphics para obtener y analizar los resultados. [14,15]

Para este sistema de oxidación, los parámetros del diseño son:

Tabla 3. Reacciones fotoquímicas y sus efectos

Reacción	Longitud de onda efectiva nm	Resultado
$H_2O + uv \rightarrow H \cdot + HO \cdot$	184.9	Destruye el agua en radicales libres
$H_2O_2 + uv \rightarrow 2HO \cdot$	253.7	Destruye el $H_2O_2$ en radicales libres
$O_2 + uv \rightarrow O_3$	253.7	Convierte las moléculas de $O_2$ a $O_3$
$RH + uv \rightarrow H \cdot + R \cdot$	184.9	Destruye orgánicos en radicales libres
$Fe^{2+} + uv \rightarrow Fe^{3+}$	253.7	Convierte el ión ferroso a ión férrico
$NO + uv \rightarrow N_2 + O_2$	184.9	Convierte el óxido de nitrógeno en $N_2$ y $O_2$
$NH_3 + uv \rightarrow NH_2 \cdot + H \cdot$	184.9	Destruye el amoníaco en radicales libres

Número de variables (k)	= 3
Experimentos en el diseño factorial $2^k$	= 8
Experimentos en el centro	= 9
Experimentos axiales $2^*k$	= 6
No. Total de tratamientos	= 23

corridas preliminares, se escogió un intervalo de 20-60 moles de  $H_2O_2$  por mol de detergente. [2]

La determinación de los niveles para cada una de las variables se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Niveles de las variables

Variables	- $\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
$X_1 = pH$	4	5	6.5	8	9
$X_2 =$ Tiempo de exposición	1.6	5	10	15	18.4
$X_3 = n H_2O_2/n LAS$	6.28	20	40	60	71.97

Para este sistema se seleccionaron el pH inicial, tiempo de exposición de la luz ultravioleta, y la relación molar  $nH_2O_2/nLAS$  como las variables independientes y como variable de respuesta se seleccionó la eficiencia (%) de remoción del detergente

#### Condiciones Experimentales.

- Concentración de detergente. Se seleccionaron concentraciones de 10 ppm y 100 ppm
- pH inicial. Se seleccionó un intervalo de pH entre 5-8 con el fin de determinar si esta variable es significativa en este método de remoción de detergentes.
- Tiempo de exposición a la luz uv. Este tiempo es definido como el tiempo que permanece expuesto a la acción de la luz uv un volumen fijo de la mezcla reaccionante. De acuerdo a una serie de corridas preliminares realizadas con este sistema, se seleccionó un intervalo de 5-15 minutos.
- $nH_2O_2/nLAS$ . Según datos encontrados en la literatura y con los resultados obtenidos en las

**Procedimiento.** Se prepararon soluciones acuosas de detergente con concentraciones de 10 ppm, en un volumen de 1.5 L. Para cada ensayo (Tabla 5) se ajustó el valor del pH utilizando buffer de acetato, se adicionó la cantidad correspondiente de peróxido de hidrógeno, seguida de un mezclado rápido a 150 rpm, inmediatamente se bombeó la mezcla reaccionante al fotorreactor, y se procedió a encender la lámpara (ver Figura 3).

Una vez transcurrido el tiempo de exposición correspondiente a cada ensayo se procedió a realizar los análisis del detergente residual por el método espectrofotométrico de anaranjado de acridina.



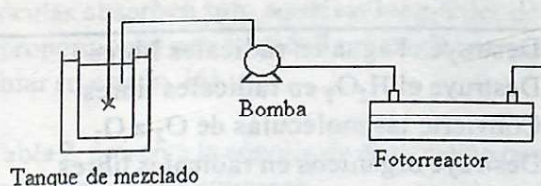


Figura 3. Diagrama de flujo. Sistema peróxido de hidrógeno - luz ultravioleta

### Procedimiento para cinética

Para determinar la variación del detergente en el tiempo se seleccionaron las condiciones de operación correspondientes a los ensayos centrales (Tabla 5). Se tomaron muestras del fotorreactor a intervalos de tiempo predeterminados, se diluyeron con el fin de inhibir la reacción y garantizar que el tiempo transcurrido para los análisis del detergente no alteren el valor de la concentración.

Los datos de concentración fueron tomados durante 22 minutos, tiempo en el cual la concentración de detergente residual empezó a ser constante.

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL DETERGENTE.

La variable de respuesta fue definida como el porcentaje de remoción del detergente en el periodo establecido para la reacción.

Con las condiciones establecidas para cada ensayo, se determinó el porcentaje de remoción de detergente para cada corrida. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 5

**Estimación del modelo.** El modelo que mejor describe el comportamiento de la eficiencia de remoción del detergente se ajustó por el programa estadístico STATGRAPHICS 7.1. y los términos del polinomio corresponden a los coeficientes de regresión.

El modelo que representa la eficiencia de remoción del detergente ( $Y$ ) de acuerdo a las variables: pH ( $X_1$ ), tiempo de exposición a la luz ultravioleta ( $X_2$ ), y  $nH_2O_2/nLAS$  ( $X_3$ ) es:

$$Y = 67.692954 + 3.174918X_1 + 1.073464X_2 + 0.32798X_3 - 0.163815X_1^2 - 0.04925X_2^2 - 0.001293X_3^2 + 0.027833X_1X_2 - 0.026421X_1X_3 + 0.003195X_2X_3.$$

Para estimar la idoneidad del modelo se realizó un análisis de varianza. Para este sistema de oxidación se tiene que el 86.36 % de la variación en la eficiencia de remoción del detergente se debe a las tres variables analizadas y 13.62 % se debe a otras variables que pueden ser: temperatura, intensidad de luz ultravioleta, etc.

De acuerdo al diagrama de Pareto reportado en el Statgraphics, se deduce que de las tres variables estudiadas las que tienen mayor incidencia en la eficiencia son el tiempo de exposición a la luz uv, y la relación  $nH_2O_2/nLAS$ .

Tabla 5. Eficiencia de remoción del detergente

Trata miento	pH inicial	Tiempo de exposición (min)	$\frac{n H_2O_2}{n LAS}$	Eficiencia (%)
1	5.0	5.0	20	87.612
2	5.0	5.0	60	94.120
3	5.0	15	20	92.319
4	5.0	15	60	94.690
5	8.0	5.0	20	92.093
6	8.0	5.0	60	90.120
7	8.0	15	20	92.250
8	8.0	15	60	96.910
9	6.5	10	40	94.290
10	6.5	10	40	94.470
11	6.5	10	40	94.670
12	6.5	10	40	94.300
13	6.5	10	40	94.480
14	6.5	10	40	94.300
15	6.5	10	40	94.380
16	6.5	10	40	94.470
17	6.5	10	40	94.440



Tabla 5. Eficiencia de remoción del detergente (continuación)

Tratamiento	pH inicial	Tiempo de exposición (min)	$\frac{n \text{ H}_2\text{O}_2}{n \text{ LAS}}$	Eficiencia (%)
18	4.0	10	40	92.110
19	9.0	10	40	94.075
20	6.5	1.6	40	86.280
21	6.5	18.4	40	95.025
22	6.5	10	6.28	89.280
23	6.5	10	71.97	96.200

El pH no afecta significativamente la eficiencia de remoción del detergente, esto se puede atribuir a que en el mecanismo de descomposición del peróxido de

hidrógeno no se generan iones  $\text{OH}^-$  y  $\text{H}^+$  reacciones (1) - (5).

Efecto del tiempo de exposición a la luz uv. Por medio de la trayectoria de ascenso por pendiente máxima se puede observar que a medida que aumenta el tiempo de exposición aumenta la eficiencia de oxidación

Tabla 6. Ascenso por pendiente máxima. Incremento por tiempo de exposición a la luz uv

pH	$\frac{n \text{ H}_2\text{O}_2}{n \text{ LAS}}$	Tiempo (min)	% de Remoción de LAS
6.5	39.13	10.5	94.4117
6.56488	42.6223	11	95.0700
6.59461	44.5841	11.5	95.3709
6.62101	46.7350	12	95.654
6.64198	49.1253	12.5	95.9203
6.65391	51.8356	13	96.1719
6.64990	55.0008	13.5	96.4128
6.61494	58.8815	14	96.6515
6.5881	64.1034	14.5	96.9124
6.15084	73.0564	15	97.3008

Efecto de la concentración inicial de peróxido de hidrógeno. En la Tabla 7, puede observarse que a medida que aumenta la concentración inicial de peróxido de hidrógeno, aumenta la eficiencia de oxidación.

Tabla 7. Ascenso por pendiente máxima. Incremento por concentración de peróxido de hidrógeno

pH	$\frac{n \text{ H}_2\text{O}_2}{n \text{ LAS}}$	Tiempo de exposición	% de Remoción de LAS
6.5000	39.13	10.0000	94.4117
6.5393	41.13	10.5943	94.8110
6.5736	43.13	11.1383	95.1538
6.6025	45.13	11.6367	95.4482
6.6253	47.13	12.0880	95.7016
6.6415	49.13	12.4977	95.9202
6.6503	51.13	12.8672	96.1095
6.6509	53.13	13.1984	96.2745
6.6426	55.13	13.4933	96.4195
6.6242	57.13	13.7539	96.5485
6.5949	59.13	13.9822	96.6648
6.5537	61.13	14.1802	96.7718
6.4996	36.13	14.3499	96.8722
6.4318	65.13	14.4937	96.9684
6.3498	67.13	14.6140	97.0625
6.2533	69.13	14.7132	97.1561
6.0184	71.13	14.7941	97.2505
6.1426	73.13	14.8595	97.3462

## 6.2 VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL DETERGENTE EN EL TIEMPO.

Se cuantificó la concentración de detergente a diferentes tiempos de reacción con el fin de evaluar su comportamiento. (Tabla 8)

Tabla 8. Variación del detergente en el tiempo

t minutos	Concentración de detergentes ppm
0	10.875
1	5.220
2	2.144
4	1.810
6	1.439
8	1.120
10	0.950
12	0.741
14	0.475
16	0.410
20	0.200
22	0.195



En la Figura 4 se observa la variación de la concentración del detergente y el porcentaje de eliminación con respecto al tiempo de reacción. Se aprecia un descenso muy fuerte de concentración en los dos primeros minutos y luego, a partir del minuto 4, se hace bastante lento. Esto corresponde a un alto porcentaje de eliminación, alrededor del 80 % a los dos minutos y luego un incremento bastante lento.

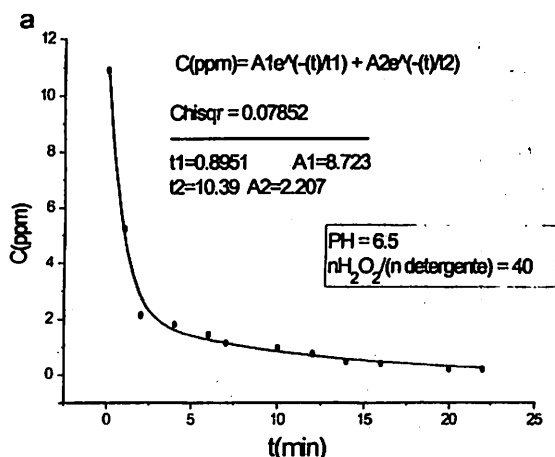


Figura 4. (a) Variación de la concentración de detergente en el tiempo

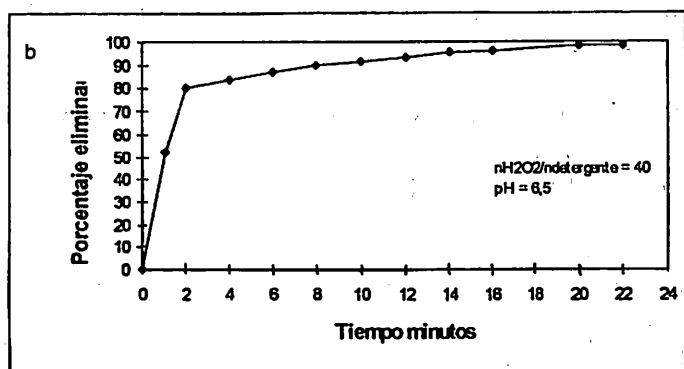


Figura 4. (b) Porcentaje de eliminación del detergente

Un comportamiento similar se puede esperar para otras relaciones molares de oxidante a detergente.

Aplicando el método integral para hallar la constante de velocidad y el orden de la concentración del detergente se graficó el  $-\ln C/C_0$  contra el tiempo y se obtuvo una línea recta (Figura 5) con la siguiente ecuación:

$$C = 10.875 e^{-(0.1577t + 0.8217)}$$

Se obtuvo un coeficiente de regresión: 0.9209

La velocidad de descomposición del detergente es de primer orden (Figura 5).

Con una constante de velocidad de  $0.1577 \text{ min}^{-1}$ .

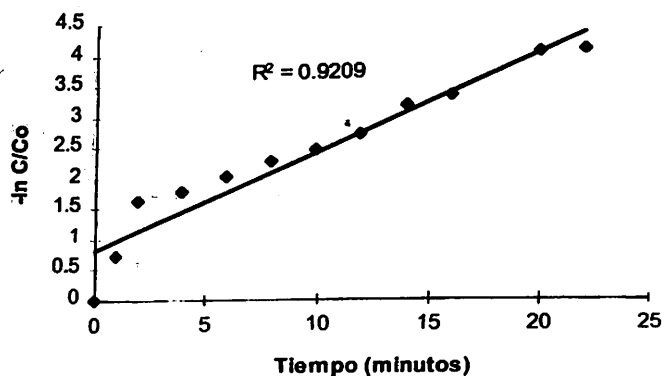


Figura 5 Velocidad de descomposición del detergente.

### 6.3 COMPARACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN INICIAL DEL DETERGENTE.

En la Tabla 9 se compara la eficiencia de remoción para las dos concentraciones de detergente propuestas a las condiciones de máxima eficiencia (Tabla 6).

Tabla 9. Comparación de la concentración inicial del detergente

Concentración del detergente(ppm)	Eficiencia (%)
100	90.291
10	97.089

### 6.4 EFECTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL DETERGENTE.

Para estudiar el efecto del catalizador en la reacción de oxidación se realizaron ensayos con concentraciones de 10 ppm de detergente a las condiciones de eficiencia

máxima (Tabla 6) con un tiempo de exposición de 15 minutos y se comparó con ensayos en ausencia de radiación.

Tabla 10. Efecto de la radiación ultravioleta

Ensayo	Eficiencia (%)
Con radiación	97.30
Sin radiación	6.48

El efecto catalizador de la radiación ultravioleta para la remoción del detergente es predominante (Tabla 10) ya que en ausencia de esta no se generan los radicales  $\cdot\text{OH}$  a una velocidad considerable y la oxidación es despreciable.

## 7. CONCLUSIONES

La eficiencia de remoción de detergente está influenciada por dos de las variables estudiadas:  $\text{nH}_2\text{O}_2/\text{nLAS}$  y tiempo de exposición a la luz uv.

Las condiciones de operación encontradas en la región estudiada para una máxima eficiencia de 97.30 %, son pH : 6.15 , tiempo de exposición 15 minutos y un valor de 73.06 en la relación  $\text{nH}_2\text{O}_2/\text{nLAS}$ .

Este sistema ofrece altas eficiencias de remoción de los detergentes, aún para concentraciones altas y en tiempos relativamente cortos.

La velocidad de descomposición del detergente es de primer orden.

El sistema de oxidación peróxido de hidrógeno - luz ultravioleta, es mucho más eficiente que el sistema peróxido de hidrógeno - sulfato ferroso de amonio [16], esto se debe principalmente a la fuente generadora radicales  $\cdot\text{OH}$  capaces de romper los enlaces entre las moléculas y por lo tanto acelerar significativamente las velocidades de la reacción.

El modelo que representa la eficiencia de remoción del detergente para este sistema es:

$$Y = b_0 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{33}X_3^2$$

## BIBLIOGRAFÍA

1. GRIEVES, Robert B. and BEWLEY, Jerry L. Treatin Laundry Wastes by Foam Separation. Journal WPCF. Vol. 45, No 3. (Mar 1973); p.471-479.
- \*2. KARLSRUHE, F.R.G. Oxidation Techniques in Drinking Water Treatment. Washington. (1979). p. 510-521; 544-554.
3. ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos A y VÉLEZ CORREA, Hugo L. Rompimiento de emulsiones y separación de las fases. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín, junio 1995.
4. MARTINEZ de BASCARAN, Gamaliel. Contaminación Industrial la problemática de los detergentes. Ingeniería Química (1989). p. 123-134.
- \*5. PRYOR, W.A. Introducción a la química de los radicales libres. 1 ed. España: Alhambra; 1975. 154p.
6. PINE, Stanley H. Química Orgánica 4 ed. México: Mc Graw Hill 1982. Pag 1012-1031
7. LIAO, Chih-Hsiang and GURO, Mirat D. Chemical Oxidation by Photolytic Decomposition of Hydrogen Peroxide. Enviromental Science and Technology. Vol. 29, No 12. (1995); p. 3007-3014
8. MING-CHUNG, Lug, et al. Photocatalytic Oxidation of Dichlorvos in the presence of Hydrogen Peroxide and Ferrous ion. Wat. Sci. Tech. Vol. 30, No 9. (1994); p. 29-38
9. SCHECK, Christop and FRIMMEL, Fritz H. Degradation of Phenol and Salicylick Acid by Ultraviolet Radiation/Hydrogen Peroxide/Oxygen. Wat.Res. Vol. 29, No 10. (1995); p. 2346-2352.

10. **NICOLE, J.M.; LEAT, J.P. and BONNEL.**  
Utilisation du rayonnement Ultraviolet dans le traitement des eaux: Mesure du flux photonique par actinometrie Chimique au Peroxyde Deu hydrogene. Water Research. Vol:24, No 2. (1990); p.157-168.
11. **MATSUURA, Takeshi and SMITH, J. M.**  
Kinetics of Photocomposition of Dodecyl Benzene Sulfonate. Industrial Engineering Chemical Fundamental. Vol. 9, No 2. (1970); p. 252-259.
12. **LEGAN, Robert W.** Ultraviolet Light takes on CPI role. Chemical Engineering. (Jan 25. 1982); p. 95-100.
13. **FRÍGOLA CÁNOVES, A.M. y BOSCH SERRAT, F.** Determinación Colorimétrica de Tensoactivos Aniónicos con Anaranjado de Acridina por extracción del par iónico. Afinidad XLIV. 412 (1986); p.483-486.
14. **COCHRAN, William y COX, Gartrude.** Diseños experimentales. 2 ed. México: Trillas, 1965. 661p.
15. **WALPOLE, R y MYERS R.** Probabilidad estadística para ingenieros. 2 ed. México: Interamericana, 1983. 578 p.
16. **EISENHAUER, Hugh R.** Chemical Removal of AB from wastewater effluents. Journal WPCF. Vol.37 No. 11. (Nov 1965); p.1567-1575.



## UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE MINAS

### -PROGRAMAS ACADÉMICOS -



#### **PREGRADO**

Ingeniería Administrativa  
Ingeniería Civil  
Ingeniería Eléctrica  
Ingeniería Geológica  
Ingeniería Industrial  
Ingeniería Mecánica  
Ingeniería de Minas y Metalurgia  
Ingeniería de Petróleos  
Ingeniería Química  
Ingeniería de Sistemas e Informática

#### **POSGRADO**

Especialización y Maestría en  
Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Maestría en Ciencia y Tecnología del  
Carbón  
Especialización en Estructuras  
Especialización en Gestión Ambiental  
Doctorado en Ingeniería Área de  
Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Especialización y Maestría en Ingeniería de  
Sistemas  
Especialización en Tratamientos Térmicos  
Especialización en Vías y Transporte