



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CINVESTAV-QUERÉTARO

**“OXIDACIÓN DE COMPUESTOS QUE
GENERAN COLOR EN LAS AGUAS
RESIDUALES”**

**Tesis para obtener el grado de Licenciatura en
Ingeniería Química.**

PRESENTA: *Rafael González Cornejo*

ASESORES:

Dra. Maricela Villicaña Méndez (UMNSH)

Dr. Juan Francisco Pérez Robles (CINVESTAV-QUERÉTARO)

Morelia, Michoacán.

ENERO 2007

**“OXIDACIÓN DE COMPUESTOS QUE
GENERAN COLOR EN LAS AGUAS
RESIDUALES”**

Rafael González Cornejo

I.1. OFICIO DE ACEPTACIÓN. ¡Error! Marcador no definido.



U.M.S.N.H.

FACULTAD DE
INGENIERIA QUIMICA

2006 Año del Bicentenario del natalicio del Benemérito de las Américas. Don Benito Juárez García

73-2006/2007

C.
RAFAEL GONZÁLEZ CORNEJO
PASANTE DE INGENIERIA
QUÍMICA
PRESENTE.

Por medio de la presente me permito informarle a usted que el tema de tesis presentada, ha sido revisada y autorizada en los términos que la presentada, ha sido revisada y autorizada en los términos que la presenta.

Tema de tesis propuesto "Oxidación de compuestos que generan colores en las aguas residuales" misma que se desarrollará bajo el siguiente índice.

- I. NOMBRE
- II. PORTADA
- III. OFICIO DE ACEPTACIÓN
- IV. INDICE
- V. REFERENCIA DE TABLA Y FIGURAS
- VI. TITULO Y RESUMEN (ABSTRACT) DE LA TESIS
- VII. INTRODUCCIÓN
- VIII. ANTECEDENTES
- IX. JUSTIFICACIÓN
- X. OBJETIVOS GENERAL
- XI. OBJETIVO PARTICULAR
- XII. HIPÓTESIS
- XIII. DESARROLLO DEL TRABAJO
- XIV. ANÁLISIS Y RESULTADOS
- XV. COCLUSIONES
- XVI. RECOMENDACIONES
- XVII. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS
- XVIII. BIBLIOGRAFIA
- XIX. GLOSARIO
- XX. APÉNDICE

Para la revisión de dicho trabajo fungirá como asesor interno la Dra. Maricela Villicaña Méndez, Profesora de la Facultad de Ingeniería Química y como asesor externo, Dr. Juan Francisco Pérez Robles.



FACULTAD DE INGENIERIA
QUIMICA

C.c.p. La secc. de certificación y titulación

A T E N T A M E N T E .

Morelia, Mich., 22 de septiembre del 2006

M. en A. DELIA MORENO JUAREZ
DIRECTORA DE LA FACULTAD

I.2. OFICIO DE MESA DE JURADO.



U.M.S.N.H.

FACULTAD DE
INGENIERIA QUIMICA

2006 Año del Bicentenario del natalicio del Benemérito de las Américas. Don Benito Juárez García

48/2005/2006.

C.
RAFAEL GONZÁLEZ CORNEJO
PASANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E .

En contestación a su atenta solicitud de fecha 06 de julio del 2006 permito comunicarle a usted que se aprueba el tema de tesis propuesto para presentar Examen Recepcional en la Carrera de Ingeniero Químico.

El tema aprobado: "Oxidación de compuestos que generan colores en las aguas residuales" el cual se desarrollará bajo el siguiente índice:

- I. NOMBRE
- II. PORTADA
- III. OFICIO DE ACEPTACIÓN
- IV. ÍNDICE
- V. REFERENCIA DE TABLA Y FIGURAS
- VI. TÍTULO Y RESUMEN (ABSTRACT) DE LA TESIS
- VII. INTRODUCCIÓN
- VIII. ANTECEDENTES
- IX. JUSTIFICACIÓN
- X. OBJETIVOS GENERAL
- XI. OBJETIVO PARTICULAR
- XII. HIPÓTESIS
- XIII. DESARROLLO DEL TRABAJO
- XIV. ANÁLISIS Y RESULTADOS
- XV. COCLUSIONES
- XVI. RECOMENDACIONES
- XVII. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS
- XVIII. BIBLIOGRAFIA
- XIX. GLOSARIO
- XX. APÉNDICE

Para tales efectos fungirá como asesor interno de su tesis la C. Dra. Maricela Villicaña Méndez Profesora de la Facultad de Ingeniería Química y su asesor externo Dr. Juan Francisco Pérez Robles y su mesa de jurado para revisión y realización de este trabajo estará integrada por:

| | |
|--------------------------------|----------------|
| ING. ERIC SALDIVAR MEDINA | (PRESIDENTE) |
| DRA. MARICELA VILLICAÑA MENDEZ | (VOCAL) |
| DRA. ILYA ESPITIA CABRERA | (VOCAL) |
| DR. RICARDO RANGEL SEGURA | (SUPLENTE) |



ATENTAMENTE
Morelia, Mich. 22 de Septiembre del 2006.

M. en A. DELIA MORENO JUAREZ
DIRECTORA DE LA FACULTAD

C.c.p. La sec. de certificación y titulación.

Edificio "M" Planta Baja
Ciudad Universitaria

Tel/Fax 3-16-71-76
3-22-35-00 Ext. 3003

II. ÍNDICE.

| | |
|--|-----|
| I.1. OFICIO DE ACEPTACIÓN..... | ii |
| I.2. OFICIO DE MESA DE JURADO..... | iii |
| II. ÍNDICE..... | iv |
| III. REFERENCIA DE TABLAS Y FIGURAS..... | v |
| IV. RESUMEN DE LA TESIS..... | 1 |
| V. INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| VI. ANTECEDENTES..... | 5 |
| VI.1. Ventajas de los procesos avanzados de oxidación..... | 7 |
| VI.2. Oxidación avanzada de efluentes con colorantes..... | 9 |
| VI.3. Tecnologías fotoquímicas..... | 10 |
| VI.4. Dióxido de titanio..... | 11 |
| VI.5. El radical hidroxilo..... | 13 |
| VI.6. Fotocatálisis heterogénea con TiO ₂ | 13 |
| VI.7. Limitaciones..... | 17 |
| VI.8. Factibilidad de la fotocatálisis heterogénea con TiO ₂ | 18 |
| VI.8.1. Ventajas y desventajas de la fotocatálisis heterogénea con TiO ₂ | 19 |
| VI.9. Parámetros que influyen en el proceso..... | 19 |
| VI.10. Parámetros limitantes de diseño..... | 22 |
| VI.10.1. Materiales para diseño de reactores..... | 24 |
| VI.10.1.1. Superficie reflectante..... | 25 |
| VI.10.1.2. Fotorreactor..... | 25 |
| VII. JUSTIFICACIÓN..... | 28 |
| VIII. OBJETIVO GENERAL..... | 29 |
| IX. OBJETIVO PARTICULAR..... | 29 |
| X. HIPÓTESIS..... | 29 |
| XI. DESARROLLO DEL TRABAJO..... | 30 |
| XI.1. Características del reactor..... | 30 |
| XI.2. Diseño del experimento..... | 32 |
| XII. ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | 33 |
| XIII. CONCLUSIONES..... | 43 |
| XIV. RECOMENDACIONES..... | 44 |
| XV. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS..... | 44 |
| XVI. BIBLIOGRAFÍA..... | 45 |
| XVII. REFERENCIAS..... | 46 |
| XVIII. GLOSARIO..... | 50 |
| XIX. APÉNDICE..... | 51 |
| a) Datos obtenidos para la curva de calibración a partir de los espectros a concentración conocida..... | 51 |
| b) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “A”..... | 53 |
| c) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “B”..... | 54 |
| d) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “BLANCO”..... | 52 |
| e) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “C”..... | 55 |
| f) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “D”..... | 56 |
| g) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “E”..... | 57 |

III. REFERENCIA DE TABLAS Y FIGURAS.

| TÍTULO DE TABLA | | PÁG. |
|-------------------|---|-----------|
| Tabla I. | Procesos avanzados de oxidación no fotocatalíticos. | 6 |
| Tabla II. | Procesos avanzados de oxidación fotocatalíticos. | 7 |
| Tabla III. | Constantes de velocidad (k en $L mol^{-1} s^{-1}$) del radical hidroxilo en comparación con el ozono para algunos compuestos orgánicos. | 8 |
| Tabla IV. | Potenciales de oxidación. | 12 |
| Tabla V. | Programa de pruebas. | 32 |
| Tabla VI. | Constantes específicas de velocidad obtenidas. | 41 |

| TÍTULO DE LA FIGURA | | PÁG. |
|---------------------|---|-----------|
| Figura 1. | Ejemplos estructurales de colorante textiles. | 3 |
| Figura 2. | Estructura cristalina del TiO_2 . | 11 |
| Figura 3. | Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor-electrolito bajo iluminación. | 14 |
| Figura 4. | Efecto de la radiación UV en una partícula de TiO_2 dispersa en agua y la subsecuente mineralización y oxidación de los compuestos orgánicos presentes. | 16 |
| Figura 5. | Dependencia de la velocidad de reacción con la intensidad de iluminación. | 20 |
| Figura 6. | Efecto de "apantallamiento" en función de la posición de la fuente de alimentación en reactores fotocatalíticos para tratamiento de agua. | 23 |
| Figura 7. | Reflectancia espectral de diferentes metales electrodepositados al vacío. | 24 |
| Figura 8. | Transmitancia de diferentes materiales válidos para reactores fotocatalíticos. | 26 |
| Figura 9. | Zona de penetración de luz solar (sin concentrar) en un reactor tubular con una concentración de TiO_2 de $1 g L^{-1}$ (catalizador en suspensión). | 26 |
| Figura 10. | Reactor diseñado. | 31 |
| Figura 11. | Diagrama del sistema de reacción. | 31 |
| Figura 12. | Espectrofotómetro UV-vis, modelo lambda 2, marca Perkin Elmer. | 32 |
| Figura 13. | Espectros de concentración conocida. | 33 |

| TÍTULO DE LA FIGURA | | PÁG. |
|----------------------------|--|-------------|
| Figura 14. | Curva de calibración. | 33 |
| Figura 15. | Espectro de cada muestra de la prueba sin la presencia de TiO ₂ . | 34 |
| Figura 16. | Efecto de la radiación UV en el colorante sin TiO ₂ . | 34 |
| Figura 17. | Espectro de cada muestra de la prueba A. | 35 |
| Figura 18. | Velocidad de oxidación de la prueba A. | 35 |
| Figura 19. | Efecto de la radiación UV en la prueba A. | 36 |
| Figura 20. | Espectro de cada muestra de la prueba B. | 36 |
| Figura 21. | Velocidad de oxidación de la prueba B. | 37 |
| Figura 22. | Efecto de la radiación UV en la prueba B. | 37 |
| Figura 23. | Espectro de cada muestra de la prueba C. | 37 |
| Figura 24. | Velocidad de oxidación de la prueba C. | 38 |
| Figura 25. | Efecto de la radiación UV en la prueba C. | 38 |
| Figura 26. | Espectro de cada muestra de la prueba D. | 39 |
| Figura 27. | Velocidad de oxidación de la prueba D. | 39 |
| Figura 28. | Efecto de la radiación UV en la prueba D. | 39 |
| Figura 29. | Espectro de cada muestra de la prueba E. | 40 |
| Figura 30. | Velocidad de oxidación de la prueba E. | 40 |
| Figura 31. | Efecto de la radiación UV en la prueba E. | 41 |

IV. RESUMEN DE LA TESIS.

“OXIDACIÓN DE COMPUESTOS QUE GENERAN COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES”

Las aguas residuales provenientes de diversos procesos químicos, contienen compuestos que les transfieren color. Aun y cuando en nuestra normatividad federal (NOM-127-SSA1-1994 en México, APHA-AWWA-WPCF en Estados Unidos o Canadian WaterQuality Guidelines en Canadá), éste parámetro no se encuentra normado, existen casos en los cuales por presiones sociales, el parámetro de color es adicionado como una obligación más a cumplir en las denominadas condiciones particulares de descarga (CPD). El problema de coloración de las aguas residuales se presenta en la industria de celulosa y papel, industria textil e industrias extractivas entre otras.

En el presente trabajo se estudió el proceso de oxidación avanzada (POA), utilizando dióxido de titanio (TiO_2) como catalizador, una fuente de radiación artificial de luz ultravioleta para activar el catalizador y así oxidar una disolución coloreada de azul 1. Las concentraciones de catalizador que se utilizaron fueron entre 150 y 450 ppm. La fuente de radiación es una lámpara comercial de luz UV marca Tecnolite código F6T5BLB. En cuanto a las concentraciones de colorante utilizadas fueron entre 12.5 ppm y 75 ppm. El seguimiento de la reacción se hizo a través de la medida de la concentración por técnicas espectrofotométricas (absorbancia) en un espectrofotómetro UV-Vis.

Los resultados nos indican que con el proceso de oxidación se logra destruir completamente el color. El tiempo de oxidación total para una concentración de 12.5 ppm de azul 1 en 150 ppm de TiO_2 prueba (A) fue de 1.5 horas, en tanto que al mantener constante la concentración de TiO_2 y aumentar la concentración de azul 1 a 25 ppm prueba (B) y 50 ppm prueba (C) se incrementaron los tiempos a 2.5 y 4.5 horas, respectivamente. Ahora bien, a una concentración de azul 1 de 50 ppm y 300 ppm el tiempo de oxidación total fue de 3 horas mostrando una disminución de 1.5 horas con respecto de la prueba (C). Al incrementar a la par la concentración de azul 1 y TiO_2 , a 75 y 450 ppm(E) respectivamente; el tiempo requerido para la oxidación total fue de 4.5 horas el, cual es 1.5 horas más que (B) y 2 horas más que (D).

**"OXIDATION OF COMPOSED THAT GENERATE COLOR IN THE RESIDUAL
WATER".**

The residual water originating from diverse chemical processes, they contain composed that transfer them color. Even and when in our federal regulatory nature, this parameter is not found established norms for, cases exist in which by social pressures, the parameter of color is added as an obligation more to comply in them called private conditions of discharge (CPD). The problem of coloring of the residual water is presented in the industry of cellulose and role, industry textile and extractive industries among others.

In the present, I work the process of oxidation advanced was studied (POA or PAO), utilizing dioxide of titanium (TiO_2) as catalyser, a source of artificial radiation of ultraviolet light to activate the catalyser and thus to oxidize a solution colored of blue 1. The concentrations of catalyser that were utilized they were between 150 and 450 ppm. The source of radiation was a commercial lamp marks Tecnolite code F6T5BLB. The concentrations of colorant in which they were handled they were between 12.5 ppm and 75 ppm. The monitoring of the reaction was carried out through the measure of the concentration by spectrophotometric techniques (absorbance) in a spectrophotometer UV-Vis.

The results indicate us that with the process of oxidation manages to destroy completely the color. The time of total oxidation for a concentration of 12.5 ppm of blue 1 in 150 ppm of TiO_2 test (A) was of 1.5 hours, while al to maintain constant the concentration of TiO_2 and to enlarge the concentration of blue 1 to 25 ppm test (B) and 50 ppm test (C) the times to 2.5 they were increased and 4.5 hours, respectively. Now well, to a concentration of blue 1 of 50 ppm and 300 ppm the time of total oxidation was of 3 hours showing a decrease of 1.5 hours with respect of the test (C). Increase about concentration of blue 1 and TiO_2 , to 75 and 450 ppm test (E) respectively; the time required for the total oxidation was from 4.5 hours the, which is 1.5 hours more than (B) and 2 hours more than (D).

V. INTRODUCCIÓN.

Dentro de los procesos industriales textiles se utilizan más de treinta mil compuestos diferentes, de los cuales alrededor de diez mil son colorantes. Como consecuencia los colorantes, conjuntamente con otros compuestos como detergentes, agentes quelantes, reguladores de pH, densificadores, etc., son habituales en las aguas residuales de estas industrias en una gran variedad de concentraciones.

De acuerdo a las limitaciones impuestas por la legislación vigente, estas aguas son tratadas mediante procedimientos físico – químicos, tratamientos biológicos o mediante lodos activados antes de ser vertidas al medio ambiente. El tratamiento de los colorantes, sin embargo, también supone un grave problema en la industria textil.

Entre los colorantes, los azóicos presentes en un (60-70%) son difícilmente oxidables mediante procedimientos aeróbicos debido, entre otras razones, a que su solubilidad en agua es baja (es inversamente proporcional a la complejidad de la molécula).

Una de las alternativas para disminuir el consumo de agua, es la reutilización de la misma que se está imponiendo en las industrias textiles. Sin embargo, como consecuencia de los requisitos de la calidad del agua necesaria para los procesos de coloración, los métodos de tratamiento son también exigentes para su posterior reutilización. Entre los métodos de purificación existentes, están aquellos basados en la oxidación siendo los más prometedores. Los procedimientos oxidativos resultan muy efectivos en la destrucción de los grupos cromóforos, ya que hacen desaparecer el color, parámetro fundamental para permitir la reutilización del agua. Sin embargo, la eliminación total (mineralización) del colorante a menudo no se alcanza utilizando los procedimientos habituales de oxidación [1].

El proceso de textiles consiste en un gran número de operaciones unitarias retroalimentadas que utilizan diversas materias primas, como algodón, lana, fibras sintéticas, o mezclas de ellas. El impacto ambiental de sus efluentes líquidos es variado, por la diversidad de materias primas, reactivos y de métodos de producción. En los efluentes se pueden encontrar sales,

almidón, peróxidos, EDTA, tensoactivos, enzimas, colorantes, metales y otros compuestos orgánicos de estructura diferente, provenientes de las distintas etapas del proceso global.

En general, las corrientes de agua de descarga provienen: del desengomado (15 %), descruce y mercerizado (20 %) del blanqueo, teñido y lavado (65 %). El mayor aporte de la carga orgánica proviene de la etapa del desengomado que aporta alrededor de 50 % del total del la DBO. La cantidad de agua empleada en los procesos textiles varía dependiendo del proceso específico y equipamiento utilizado por la planta. Por ejemplo, en el teñido con colorantes dispersos, se utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto. En la tinción con colorantes reactivos, las cifras varían entre 125 y 170 litros por kilogramo de producto [2].

Los colorantes textiles tienen gran persistencia en el ambiente, y los métodos de eliminación clásicos no son útiles debido a que oxidaciones o reducciones parciales pueden generar productos secundarios altamente tóxicos. Una gran proporción de los colorantes no son directamente tóxicos para los organismos vivos; sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cursos de agua, por lo que su presencia debe ser controlada [3].

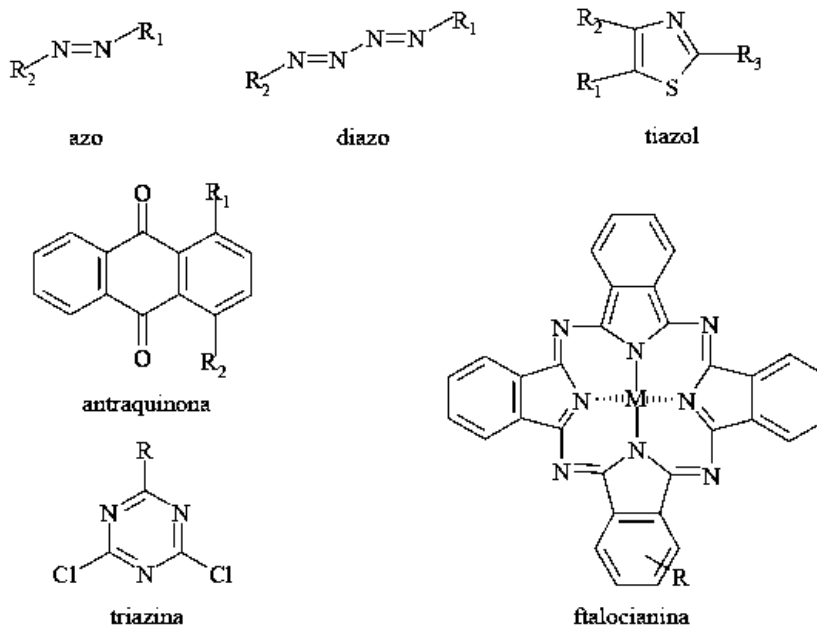


Figura 1. Ejemplos de colorantes textiles.

En general, las moléculas de los colorantes utilizados en los textiles son estructuras complejas. La mayoría son de origen sintético, muy solubles en agua, altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables. Alrededor del 60 % de los colorantes en uso en la industria textil actual son *colorantes reactivos*, que se caracterizan por formar una unión del éter con la fibra, garantizando mayor duración del color en el tejido. Sus estructuras contienen grupos azo, antraquinona o ftalocianina (Figura 1). Dadas sus características de solubilidad y estabilidad, los métodos tradicionales de floculación, sedimentación o adsorción no son útiles en la remoción de estos compuestos. [4]

Los tratamientos biológicos de efluentes líquidos de la industria textil incluyen básicamente tratamientos aeróbicos y anaeróbicos y son precedidos por una o más etapas de tratamiento primario, como sedimentación, tamizado, coagulación, ecualización, neutralización, o cualquier otro tratamiento fisicoquímico avanzado, como ultrafiltración o adsorción sobre carbón activado. La eficiencia del tratamiento biológico para la remoción de la DQO depende fuertemente de la relación DBO_5/DQO . El valor medio de esta razón en un efluente de la industria textil es alrededor de 0.35, lo que hace difícil la eliminación total de la DQO. Es conveniente llevar esta razón a un valor mayor de 0.6 para lograr una biodegradabilidad aceptable [5]. Una revisión amplia sobre la biodegradación de colorantes textiles, demostró que la mayoría de los colorantes no muestran biodegradación significativa en medios aeróbicos y que la desaparición del color del efluente se atribuye a la adsorción de las moléculas intactas de colorante en el lodo [6].

VI. ANTECEDENTES.

La creciente demanda de la sociedad para descontaminar aguas de diversos orígenes, y regulaciones cada vez más estrictas (como NOM-127-SSA1-1994 en México, APHA-AWWA-WPCF en Estados Unidos o Canadian WaterQuality Guidelines en Canadá), ha impulsado, en la última década, al desarrollo de nuevas tecnologías de purificación. El objetivo de cualquier tratamiento de contaminantes en agua es eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos, biológicos, tóxicos, etc., presentes en un efluente y una vez tratado cumpla las especificaciones de vertido determinadas por los organismos competentes.

Los procesos y tecnologías de que se dispone para el tratamiento de contaminantes en agua son clasificados en:

- Tratamientos naturales. Requieren condiciones de contaminación específicas comparables a las urbanas.
- Tratamientos primarios. Separan por medios físicos partículas en suspensión que existan en el agua a tratar.
- Tratamientos secundarios. Procesos biológicos empleados para degradar la materia orgánica.
- Tratamientos terciarios. Procesos para sustraer contaminantes que no han podido ser eliminados en las fases de tratamiento anteriores. (Entre los cuales figuran los POA = PAO = TAO)

Los PAO (Procesos Avanzados de Oxidación) son procesos de tratamiento terciario basados en la generación de especies fuertemente oxidantes. En la práctica, la aplicación de los POAs, debe tener en cuenta la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar [7]. Las aguas contaminadas por la actividad humana, son procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales. Sin embargo, en algunos casos estos procedimientos son inadecuados, por el uso posterior del efluente tratado. En estos casos, se está recurriendo en los países industrializados al uso de (PAOs), muy poco aplicados y menos difundidos en

los países de economías emergentes como América Latina. La mayoría de los PAOs se aplican a la remediación y destoxificación de aguas especiales, en pequeña o mediana escala. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelos. Permiten incluso la desinfección por inactivación de bacterias y virus.

Los PAOs [8-12] también se basan en procesos fisicoquímicos que producen cambios en la estructura química de los contaminantes. El concepto inicialmente establecido por Glaze y colaboradores [13-14], definieron los PAOs como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias, principalmente el radical hidroxilo (HO^*). Este radical, generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica. Algunos PAOs, como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, recurren además a reductores químicos que reaccionan con los contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados.

Tabla I: Los procesos avanzados de oxidación no fotoquímico.

- Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)
- Ozonización con peróxido de hidrógeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$)
- Procesos Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) y relacionados
- Oxidación electroquímica
- Radiólisis γ y tratamiento con haces de electrones
- Plasma no térmico
- Descarga electrohidráulica - Ultrasonido

Existen otras tecnologías que pueden incluirse también entre los PAOs, como el tratamiento con barreras permeables reactivas de Fe metálico (Fe cero valente) [15-16] y la oxidación con K_2FeO_4 (Fe(VI)) [17].

Tabla II.: Los procesos avanzados de oxidación fotoquímicos.

- Oxidación en agua subcrítica y supercrítica
- Procesos fotoquímicos
- Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
- UV/peróxido de hidrógeno
- UV/O₃
- Foto-Fenton y relacionadas
- Fotocatálisis heterogénea

VI.1. Ventajas de los procesos avanzados de oxidación.

Entre las ventajas de las tecnologías oxidativas sobre los métodos convencionales están las siguientes:

- Capacidad potencial para llevar a acabo una mineralización de los contaminantes orgánicos y compuestos inorgánicos hasta CO₂ e iones (Cl⁻ o NO⁻).
- Reactividad con la mayoría de los compuestos orgánicos.
- Descomposición de los reactivos utilizados como oxidantes en productos inocuos.
- No sólo cambian de fase al contaminante, sino que lo transforman químicamente.
- Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- Usualmente no generan lodos que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- Son útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento biológico.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (ppb).
- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.

- Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- En muchos casos, consumen menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).
- Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos como el tratamiento biológico.
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.

Los PAOs son especialmente útiles como tratamiento posterior a un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación [18]. Las ventajas antes mencionadas se deben a que los procesos involucrados poseen una mayor factibilidad termodinámica y una velocidad de oxidación mayor, incrementada por la participación de radicales, principalmente el radical hidroxilo (HO^*). Esta especie posee propiedades para atacar virtualmente a todos los compuestos orgánicos y reaccionar 10^6 - 10^{12} veces más rápido que oxidantes alternativos como el O_3 . Después del flúor, el HO^* es el oxidante más energético. En la Tabla III, se puede observar la diferencia en las constantes de velocidad de reacción de distintos compuestos con el radical hidroxilo y con el ozono. Se debe mencionar que, para ser eficientes, los PAOs deben generar altas concentraciones de radicales hidroxilo en estado estacionario.

Tabla III. Constantes de velocidad (k en $L mol^{-1} s^{-1}$) del radical hidroxilo en comparación con el ozono para algunos compuestos orgánicos [19].

| <i>Compuesto</i> | <i>HO^*</i> | <i>O_3</i> |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| Alquenos clorados | 10^9 - 10^{11} | 10^{-1} - 10^3 |
| Fenoles | 10^9 - 10^{10} | 10^3 |
| Aromáticos | 10^8 - 10^{10} | 1 - 10^2 |
| Cetonas | 10^9 - 10^{10} | 1 |
| Alcoholes | 10^8 - 10^9 | 10^{-2} - 1 |
| Alcanos | 10^6 - 10^9 | 10^{-2} |

Por diversas razones, el proceso de tratamiento y/o purificación de aguas mediante fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio como catalizador es, una de las aplicaciones

fotoquímicas que más interés ha despertado entre la comunidad científica internacional. Por un lado, la fotocatalisis heterogénea, a diferencia de la mayoría de los procesos fotoquímicos, no es selectiva y se emplea para tratar mezclas complejas de contaminantes [20]. Por otro lado, la posibilidad de utilización de radiación solar como fuente primaria de energía, le otorga un importante y significativo valor medioambiental [21-22]; el proceso, constituye un ejemplo de tecnología sostenible.

VI.2. Oxidación avanzada de efluentes con colorantes.

Se han utilizado diferentes procesos avanzados de oxidación para la degradación química de los colorantes: O_3 , O_3/UV , H_2O_2/UV y fotocatalisis heterogénea. También se han estudiado tratamientos combinados de fotocatalisis y oxidación electrolítica. Perkowski y colaboradores [23] utilizaron O_3 para oxidar un efluente que contenía dos colorantes de tipo azo y uno del tipo antraquinona. La remoción de color alcanzó el 93 % después de 120 minutos de tratamiento. Arslan y colaboradores [24], utilizaron O_3 , H_2O_2/O_3 y H_2O_2/UV , en el tratamiento de un efluente que contenía 6 colorantes reactivos, y observaron que el O_3 remueve más rápidamente el color de la solución. Gregor [25] estudió la eficiencia de los sistemas O_3 , H_2O_2/O_3 y H_2O_2/UV para tratar 4 efluentes que contenían mezclas de colorantes tipo ácido, complejo metálico y disperso. Los mejores resultados obtenidos muestran que el sistema O_3/UV elimina el 78 % del color, mientras que el empleo de H_2O_2/UV alcanza eliminaciones de color en un 94 %. La combinación con una etapa biológica posterior conduce a una decoloración total de la solución.

La mayor parte de los experimentos de fotooxidación asistida por TiO_2 o ZnO emplea suspensiones del semiconductor en la solución acuosa. Galindo y colaboradores [26] estudiaron la degradación del colorante naranja ácido 53 utilizando los sistemas H_2O_2/UV , TiO_2/UV y TiO_2/VIS , logrando, con los dos primeros sistemas, la decoloración total a 250 min y 500 min, respectivamente. Zhang y colaboradores [27] trataron soluciones de eosina con luz visible, $\lambda > 470$ nm, observando la eliminación total del color después de 8 horas de irradiación. Wang [28] estudió la degradación de ocho colorantes comerciales de diferentes tipos: reactivo, directo, ácido y catiónico; utilizando suspensiones de TiO_2 y luz solar como

fuelle de radiación, obtuvo un 90 % de decoloración. Por otro lado, Kiriakidou y colaboradores [29] estudiaron el efecto de distintos parámetros operativos, en la degradación de naranja ácido-7, observando un efecto sinérgico entre la irradiación UV y visible para conducir la degradación del colorante.

A pesar de los buenos resultados obtenidos al utilizar las partículas del semiconductor en suspensión, esta metodología requiere una etapa de separación del catalizador desde la solución tratada. Para evitar la etapa de filtración y aumentar la eficiencia del semiconductor, se ha intentado el anclaje del catalizador sobre un soporte inerte [30-33], el agregado de especies metálicas que minimicen la recombinación de cargas [34-35], el uso de agentes oxidantes como aceptores de electrones para la banda de conducción [36] y, por último, el diseño de reactores que permitan el aprovechamiento máximo de la fuente luminosa [37].

VI.3. Tecnologías fotoquímicas.

La capacidad de los radicales hidroxilos de oxidar compuestos orgánicos sugiere también la utilidad de explorar su generación fotoquímica. El uso de luz proporciona ventajas en el tratamiento de aguas y efluentes, que no se limita al aprovechamiento del HO* como oxidante:

- En algunos casos, es posible utilizar los procesos fotolíticos directos, sin el agregado de reactivo químico alguno. Este proceso es importante para compuestos que reaccionan lentamente con HO*. La destrucción de compuestos orgánicos clorados tales como trihalometanos (THM), clorometanos, cloroetanos, aromáticos y fenoles mediante el uso de irradiación de 254 nm se halla bien documentada en la literatura [38-39].
- Evita el uso de O₃ o reduce su proporción, reduciendo costos, riesgos para la salud y preocupaciones ambientales.
- Aumenta la velocidad de reacción en comparación con la misma técnica en ausencia de luz.
- Evita cambios de pH drásticos (por ejemplo, el O₃ necesita pH altos).
- Aumenta la flexibilidad del sistema ya que permite el uso de una variedad de oxidantes y condiciones de operabilidad.
- Reduce costos operativos debido a un menor consumo de potencia para generar HO*.

VI.4. Dióxido de titanio.

El titanio es el noveno elemento más abundante sobre la superficie terrestre. En su forma más estable, como un óxido, puede ser encontrado en tres formas cristalinas: broquita, rutilo y anatasa (Figura 2). Desde el punto de vista fotocatalítico, solo las fases rutilo y anatasa resultan relevantes, con una actividad muy alta.

El dióxido de titanio es un semiconductor con una energía de band gap alrededor de 3.2 eV, como consecuencia, la longitud de onda requerido para fotoexcitar un electrón es $\lambda > 390$ nm, valor muy cercano a la frontera UV-Vis. Las ventajas que presenta el TiO_2 es que es químicamente inerte, fotoestable, presenta altas velocidades de reacción y un precio relativamente bajo.

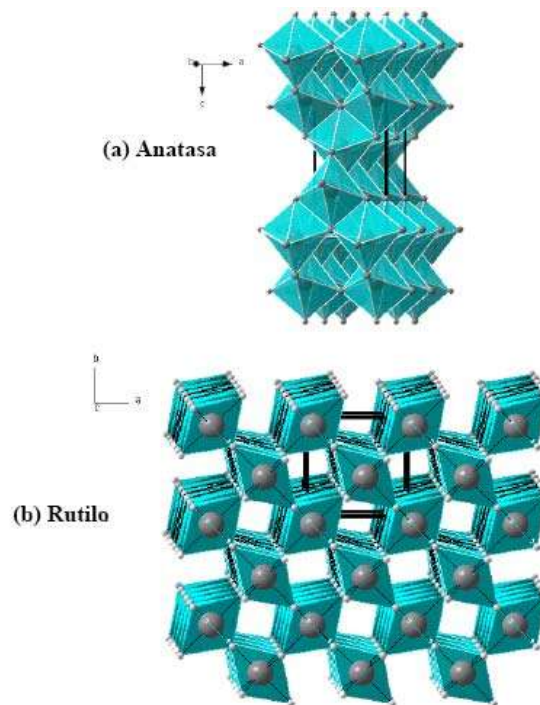


Figura 2. Estructura cristalina del TiO_2 .

Una partícula semiconductor es el catalizador ideal para una acción determinada si: los productos se forman con una elevada especificidad, si permanece inalterada durante el

proceso, si se requiere la formación de pares electrón-hueco y si no se almacena energía fotónica en los productos finales.

La mayoría de los semiconductores estudiados como fotocatalizadores son los metales calcogénidos (CdS, ZnS, CdSe, ZnSe, CdTe) o los óxidos de metales (TiO₂, ZnO, SnO₂, WO₃). El dióxido de titanio TiO₂, ha demostrado ser un excelente catalizador para la fotooxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos.

En las investigaciones sobre tratamiento de aguas, el TiO₂ es usado en suspensión. El uso de mezcladores implica un subsecuente paso de separación, (centrifugación, filtración, o coagulación/floculación). Esto incrementan la complejidad y costos de los procesos pero, los sistemas fotocatalíticos de reactores con mezclado son muy eficientes cuando son comparados con reactores de catalizador soportado, debido a la alta superficie catalítica obtenida.

Tabla IV. Potenciales de oxidación de algunas especies.

| <i>Especie</i> | <i>E⁰ (V, 25 °C)¹</i> |
|-----------------------|---|
| Flúor | 3,03 |
| Radical hidroxilo | 2,80 |
| Oxígeno atómico | 2,42 |
| Ozono | 2,07 |
| Peróxido de hidrógeno | 1,78 |
| Radical perhidroxilo | 1,70 |
| Permanganato | 1,68 |
| Dióxido de cloro | 1,57 |
| Ácido hipocloroso | 1,49 |
| Cloro | 1,36 |
| Bromo | 1,09 |
| Yodo | 0,54 |

¹ Los potenciales están referidos al electrodo normal de hidrógeno.

VI.5. El radical hidroxilo.

Como se puede observar en la tabla IV, la especie más oxidante después del flúor es el radical hidroxilo, de vida corta, un oxidante capaz de atacar casi cualquier molécula orgánica. Las reacciones en soluciones acuosas que involucran la presencia de radicales OH* muestran una velocidad constante de reacción del orden de $10^6 - 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Además, el radical hidroxilo es caracterizado por una baja selectividad de ataque, atributo útil para un oxidante empleado en tratamiento de aguas residuales.

VI.6. Fotocatálisis heterogénea con TiO₂.

La fotocatálisis es la aceleración de una fotorreacción en presencia de un catalizador. Este término incluye un proceso de alteración fotoquímica de alguno de los contaminantes como resultado de la absorción de radiación por otra especie fotosensible, el catalizador. La fotocatálisis heterogénea es el uso de un sólido semiconductor (TiO₂, SiO₂, ZnO, etc) que forma una suspensión estable bajo irradiación para estimular una reacción en la interfase sólido/líquido o sólido/gas.

La fotocatálisis heterogénea se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (el fotocatalizador heterogéneo) que es un semiconductor de banda ancha. En la región interfacial entre sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción o remoción de los contaminantes, sin que el catalizador sufra cambios químicos. La excitación del semiconductor puede tener lugar de dos formas:

- Por excitación directa del semiconductor (éste es el que absorbe los fotones usados en el proceso). Este caso corresponde al de mayor aplicabilidad en fotocatálisis heterogénea: Películas.
- Por excitación inicial de moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador, las que a su vez son capaces de inyectar cargas (electrones) en el semiconductor.

La Figura 3, muestra las reacciones químicas que ocurren en una partícula de semiconductor cuando ésta es excitada con luz suficientemente energética. En estas condiciones, se crean pares electrón-hueco cuya vida media está en el rango de los nanosegundos; en ese lapso deben migrar a la superficie y reaccionar con especies adsorbidas (procesos c y d) [40]. Los pares electrón-hueco que no alcanzan a separarse y a reaccionar con especies en la superficie se recombinan y la energía se disipa. Esta recombinación puede tener lugar tanto en la superficie como en el seno de la partícula (procesos a y b, respectivamente). El proceso neto es la catálisis de la reacción entre el oxidante B y el reductor A (por ejemplo, O_2 y materia orgánica).

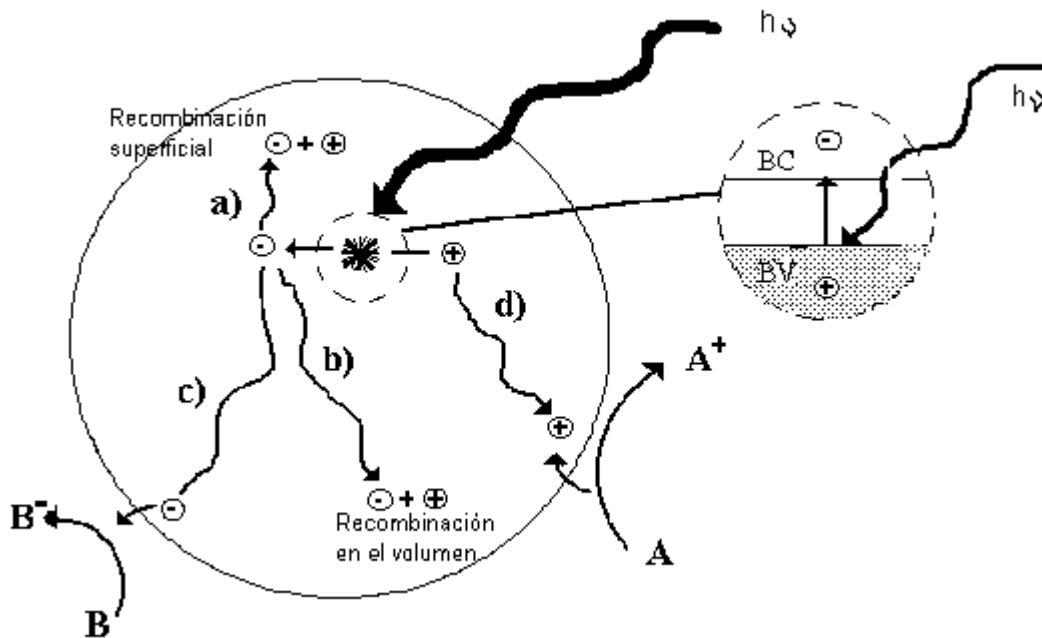
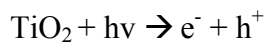


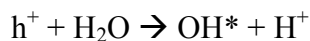
Figura 3. Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor-electrolito bajo iluminación.

Aquí, el mecanismo de fotorreacción inicia cuando el semiconductor es iluminado con fotones cuya energía es igual o mayor a la separación energética existente entre la banda de valencia y la de conducción (band-gap). En esta situación, tiene lugar una absorción de esos fotones y la creación de pares electrones-hueco en el seno del catalizador, los cuales se disocian en fotoelectrones libres en la banda de conducción y fotohuecos en la de valencia. Simultáneamente, tiene lugar una adsorción de los contaminantes y el fotohuevo genera un radical hidroxilo (OH^*) que oxidará el contaminante adsorbido [41].

La transferencia de cargas ocurre a través de la interfase sólido/líquido. Durante la fotoexcitación cuando un fotón de energía suficiente es adsorbido las bandas curvadas adquieren las condiciones necesarias para la separación de cargas (par e^-/h^+). Para el caso de TiO_2 se genera un exceso de electrones en la banda de conducción y huecos positivos h^+ en la banda de valencia.



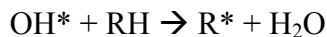
Para formar grupos hidroxilos, en la superficie del TiO_2 , el h^+ reacciona con H_2O adsorbida



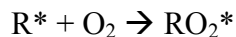
y con grupos OH^-



Entonces la oxidación de los contaminantes con los radicales OH^* produce radicales orgánicos libres:



Los cuales reaccionan con el O_2 produciendo radicales peroxi que pueden iniciar reacciones de oxidación en serie y conducen a la mineralización completa de los compuestos orgánicos.



Cabe mencionar que los radicales libres R^* reaccionan con el oxígeno formando radicales peroxilo (RO_2^*); pero si el oxígeno disuelto es insuficiente los radicales libres pueden reaccionar por recombinación o por dismutación.

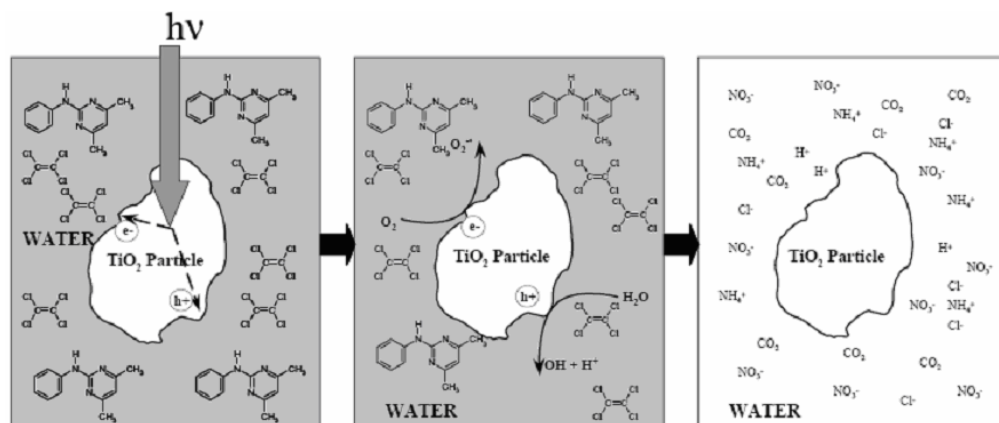
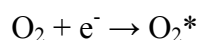
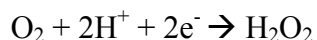


Figura. 4. Efecto de la radiación UV en una partícula de TiO_2 dispersa en agua y la subsecuente mineralización y oxidación de los compuestos orgánicos presentes.

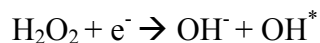
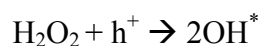
En aplicaciones ambientales, los procesos fotocatalíticos se llevan a cabo en ambientes aeróbicos, con lo cual el oxígeno adsorbido es la principal especie aceptora de electrones, donde los electrones en exceso de la banda de conducción reaccionan con el oxígeno molecular para formar radicales superóxido:



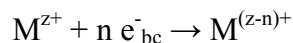
y peróxido de hidrógeno.



Tanto el radical superóxido como el peróxido de hidrógeno, generan más radicales hidroxilos [42]:



Si las aguas contienen iones metálicos, los electrones de la banda de conducción pueden reducirlos a un estado de oxidación más bajo, e incluso precipitarlos como metales sobre el semiconductor:



VI.7. Limitaciones.

La eficiencia de la reacción fotocatalítica depende de la probabilidad de recombinación electrón-hueco, que compite con la separación entre las cargas fotogeneradas. Por otra parte, como no hay una separación física entre los sitios de las reacciones anódicas (oxidación por huecos) y catódicas (reducción por electrones), puede tener importancia las reacciones inversas. La baja eficiencia, especialmente con luz visible, es una limitante severa de la fotocatalisis heterogénea. Para aumentar la eficiencia del proceso fotocatalítico, se tiene estrategias, entre ellas:

- *Modificación del semiconductor:* para extender su respuesta a radiaciones de mayor longitud de onda o para incrementar la eficiencia en la separación electrón-hueco y minimizar su recombinación. La separación efectiva de las cargas fotogeneradas se consigue por deposición de metales en la superficie del semiconductor [43]. La presencia de depósitos metálicos sobre la superficie del semiconductor altera las propiedades eléctricas de éste, al crearse nuevas interfaces de tipo metal-semiconductor. Otro aspecto, es el dopado del semiconductor con metales de transición.
- *Uso de un sistema de semiconductores acoplados:* la iluminación de uno de los dos produce una respuesta en el otro semiconductor o en la interfaz entre los dos [44]. Con ello se logra aumentar la eficiencia de la separación de cargas fotogeneradas y extender la respuesta a irradiaciones menos energéticas.
- *Uso de fotocatalizadores soportados, con aplicación de potenciales eléctricos:* de esta forma, se separan las reacciones anódicas y catódicas, y se reduce drásticamente la recombinación electrón – hueco.

A pesar de estas limitaciones, los procesos fotocatalíticos basados en el TiO₂, han tenido éxito. Si bien el rendimiento cuántico (número de eventos producidos por fotón absorbido) suele ser

bajo en términos de conversión química, los rendimientos obtenidos, en términos de conversión en función del tiempo, aprovechando luz solar o iluminación con lámparas son elevados en muchos casos [45].

VI.8. Factibilidad de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 .

La factibilidad del proceso depende críticamente de la estabilidad del semiconductor, y ello limita las opciones de elección de los materiales. Aunque no existe una regla general, cada aplicación potencial de la fotocatalisis debe desarrollarse individualmente, las siguientes directrices generales acotan en un sentido amplio las condiciones en las que un determinado caso real pueda ser abordado mediante técnicas de fotocatalisis con posibilidades de éxito:

Concentración máxima orgánica de varios cientos de mg L^{-1} . Los procesos de fotodegradación son eficientes cuando la concentración de los contaminantes es baja, media y hasta unos pocos de cientos de ppm de orgánicos. Si bien el límite varía con la naturaleza de los contaminantes, la fotocatalisis no es una opción conveniente si las concentraciones superan el valor de 1 gr L^{-1} (a menos que se recurra a una etapa previa de dilución).

Contaminantes no biodegradables. Los tratamientos biológicos son en general más económicos, pero si los contaminantes no son biodegradables, los procesos fotocatalíticos son una alternativa.

Contaminantes peligrosos presentes en mezclas de orgánicos complejos. Una de las ventajas de la fotocatalisis, su escasa o nula selectividad, permite que se puedan tratar al mismo tiempo los contaminantes no biodegradables que puedan estar presentes en una mezcla compleja con otros compuestos orgánicos.

Contaminantes cuyo tratamiento convencional es difícil. La fotocatalisis, es especialmente útil en aquellos casos en los que los métodos convencionales son complejos y/o costosos.

VI.8.1. Ventajas y desventajas de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 .

Las características que hacen que la fotocatalisis heterógena sea atractiva para el tratamiento de efluentes contaminados incluyen [46]:

- Es un método que destruye completamente sustancias tóxicas hasta compuestos inocuos, incluyendo cualquier sustancia orgánica.
- Las sustancias contaminantes son eliminadas en un proceso, sin necesidad de ser extraídas previamente del medio en que se encuentran disueltas.
- El aporte de energía es pequeño, el proceso tiene lugar a temperaturas que van de los 20 a los 80 °C. El proceso puede realizarse a la presión y temperatura del medio.
- El oxígeno requerido para la reacción es obtenido de la atmósfera.
- El catalizador (TiO_2), es barato (Aldrich: \$2200/500 gr; Baker: \$1769/500 gr; o birn s granel: USD 4.6/kg), inocuo y se reutiliza. Además, puede ser anclado a diferentes matrices inertes como sílice o alúmina.
- La fuente de fotones puede ser el sol, una fuente de energía renovable y sin costo alguno.

Por otro lado, algunos puntos en contra son:

- Los reactores de lecho fluidizado requieren técnicas específicas de separación.
- La relación de moléculas reactivas–fotones adsorbidos (campo de cuantos bajos).
- Bajas velocidades de degradación.

VI.9. Parámetros que influyen en el proceso.

Los parámetros que influyen cualitativa y cuantitativamente en el proceso de oxidación-reducción fotocatalizado se mencionan algunos:

pH. El proceso de fotocatalisis es más eficiente en medio ácido ($3 \leq \text{pH} \leq 5$). El pH afecta las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto a degradar, manifestándose en alteraciones de la velocidad de degradación y en la tendencia a la floculación del catalizador.

Características del catalizador. En general, para un fotocatalizador tiene: alta área superficial, distribución de tamaño de partícula uniforme, forma esférica de las partículas y ausencia de porosidad interna. La anatasa parece ser la forma cristalina con mejores propiedades fotocatalíticas y esto ha sido atribuido, a la mayor capacidad de fotoadsorción de la anatasa por oxígeno molecular y sus formas ionizadas y a su baja rapidez relativa de recombinación de pares hueco-electrón. Con el fin de aumentar su eficiencia fotocatalítica, el TiO_2 ha sido dopado con diversos iones metálicos, y también se ha sensibilizado el catalizador a longitudes de onda mayores, (luz visible) empleando tintes o colorantes tanto orgánicos como organometálicos.

Temperatura. La velocidad de las reacciones fotocatalíticas no se modifica apreciablemente con la variación de la temperatura del sistema.

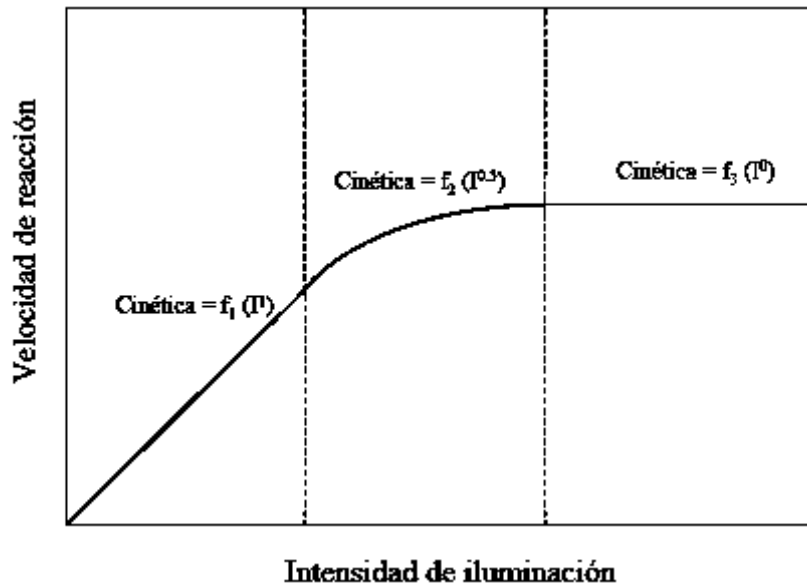


Figura 5. Dependencia de la velocidad de reacción con la intensidad de iluminación..

Intensidad de la radiación. La Figura 5, muestra la influencia de la intensidad de la radiación sobre la velocidad de reacción. El cambio de un orden parcial de 1 a 0,5 significa que la recombinación de $e_{bc-} - h_{bv+}$ comienza a limitar el aprovechamiento de los fotones disponibles, y un cambio a un orden cero indica que el sustrato no puede generar más pares [47] aun cuando aumente la intensidad de la radiación. Estos resultados son importantes para el diseño de los colectores cuando se usa radiación solar. Los colectores de canal parabólico, usados

para el tratamiento de agua, son reemplazados por sistemas de bajo flujo radiativo; la eficiencia de estos últimos está basada en el alto porcentaje de fotones UV de la componente difusa del espectro solar y en la baja dependencia del proceso fotocatalítico con la intensidad de la radiación [48-49]. Aproximadamente un 50% de los fotones UV disponibles en la radiación solar se encuentran en la componente difusa.

Diseño del reactor. Los parámetros derivados del diseño y del tipo de reactor: factores como la geometría, la óptica, distribución de luz, tipo de flujo, etc. van a influir sobre el rendimiento final del mismo. Existen varios factores importantes en el diseño de un reactor fotocatalítico utilizando un catalizador sólido: elevada área superficial de catalizador por unidad de volumen del reactor, distribución óptima de luz dentro del reactor. Además de los parámetros convencionales tales como distribución de flujo, mezclado e interacción entre reactivos y catalizador, transferencia de masa, etc, [50].

Aditivos. Determinadas sustancias pueden incidir en la eficacia del proceso de fotocátalisis. Aniones inorgánicos como cloruros, sulfatos y fosfatos inhiben el proceso; otros, como nitratos y percloratos, apenas si tienen influencia sobre la velocidad. La inhibición se relaciona con la adsorción de dichos iones sobre el catalizador, que compite con la adsorción del contaminante, especialmente cuando favorezcan la recombinación de pares $e_{bc-} - h_{bv+}$.

Además, los agentes oxidantes son imprescindibles para la degradación del contaminante, ya que participan en la reacción de oxidación, siendo responsables de una de las dos semirreacciones (la captura de huecos); cuanto más eficaz sea el agente oxidante para capturar huecos, mayor será la velocidad del proceso [51].

El oxígeno es el oxidante más empleado, ya que es el más barato y no compite con el sustrato en el proceso de adsorción. El peróxido de hidrógeno se usa en los procesos de fotooxidación homogénea, con radiación UV de longitud de onda entre 290 y 320 nm.

VI.10. Parámetros limitantes de diseño.

La disposición del catalizador dentro del reactor, así como el tipo de soporte inerte a utilizar, si no se quiere trabajar con suspensiones [52]. Se ha usado para ello tanto vidrio (en forma de bolas o depositando el catalizador directamente sobre la superficie del tubo por donde circula el agua), como diferentes materiales cerámicos, polímeros e incluso algunos metales. Estos soportes pueden ser en forma de malla, reticulares, etc. Las desventajas de la utilización de soportes dentro del reactor serían:

- La disminución de superficie de TiO_2 activada, en un determinado volumen de reactor, en comparación con el mismo volumen con catalizador en suspensión.
- Limitaciones en la transferencia de materia a bajos caudales. Este efecto es más intenso cuando se aumenta la potencia de iluminación, no aprovechándose una parte de ella. Cuando esto ocurre, la velocidad de reacción no aumenta al hacerlo el flujo de fotones.
- Dificultades para conseguir una correcta iluminación, cuando la fuente de fotones no se sitúa en el interior del reactor. Esto es problemático cuando se pretende trabajar con radiación solar.
- Aumento de la pérdida de carga del reactor. La consecuencia es un incremento de los costes energéticos, y del capital, ya que se deben instalar sistemas de bombeo de mayor potencia.

La forma en que la radiación incide sobre el reactor y la longitud del camino óptico de ésta en su interior son fundamentales para determinar la concentración óptima de catalizador:

- Si la lámpara está en el interior de reactor y coaxial con éste, la $[\text{TiO}_2]$ para r_{max} es alta si el camino óptico es corto. En cambio, la $[\text{TiO}_2]$ para r_{max} es baja si alcanza varios centímetros.
- Si la lámpara está en el exterior, pero el camino óptico es corto (1-2 cm max.), r_{max} se consigue con 1-2 g L^{-1} de TiO_2 .
- Si la lámpara está en el exterior (similar a lo que se produce en un reactor iluminado por radiación solar), pero el camino óptico alcanza varios centímetros, la concentración adecuada de catalizador es de unos cientos de miligramos por litro.

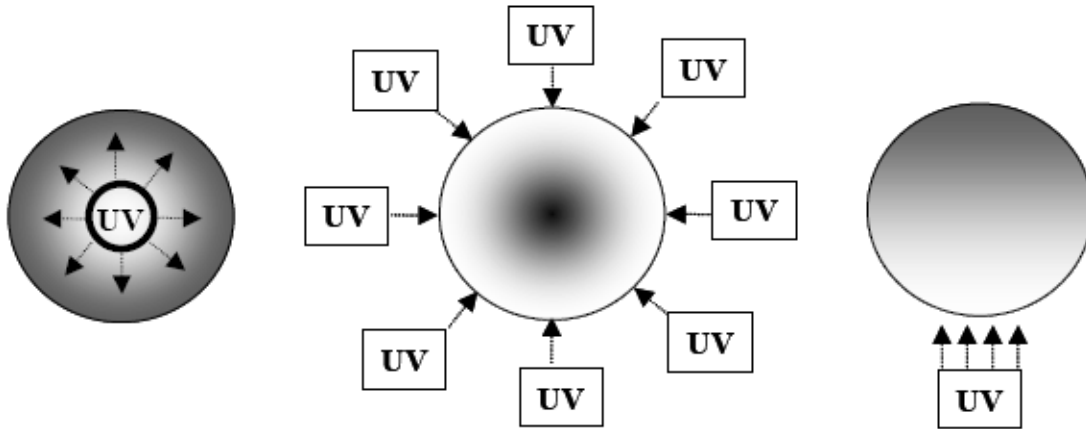


Figura 6. Efecto de “apantallamiento” en función de la posición de la fuente de alimentación en reactores fotocatalíticos para tratamiento de agua.

En todos los casos anteriormente expuestos, se produce también un efecto de "apantallamiento", cuando la concentración de TiO_2 es muy alta. La velocidad de reacción disminuye debido a la excesiva opacidad de la disolución, que impide que el catalizador de la parte más interna del reactor se ilumine. La intensidad de iluminación afecta a la relación entre la velocidad de reacción y la concentración de TiO_2 . A mayor intensidad, más elevada puede ser la concentración de catalizador. Además, la dispersión y absorción de la luz provoca un descenso aproximadamente exponencial de la densidad fotónica, a lo largo del camino óptico recorrido dentro de una suspensión de catalizador [53]. Por todo ello, se hace necesario determinar experimentalmente la concentración de catalizador óptima para cada tipo de reactor; en el caso de procesos en fase acuosa, la concentración mínima a la que se obtiene la velocidad de reacción máxima.

Cuando la concentración de catalizador/sensitizador es muy alta, un efecto “pantalla” produce excesiva opacidad en la solución, impidiendo a las partículas más lejanas ser iluminadas y reduciendo el rendimiento del sistema. Los diámetros demasiado pequeños no tienen sentido debido a la alta pérdida de presión y un diámetro muy grande implica un volumen oscuro considerable, reduciendo el rendimiento global del sistema.

En este proceso heterogéneo en fase acuosa con el catalizador TiO_2 en suspensión, es importante evitar cualquier posible sedimentación del catalizador, que puede ocurrir en

determinadas circunstancias si se alcanza un flujo laminar en alguna zona del reactor. En este sentido, se debe de realizar el diseño teniendo en cuenta que el número Reynolds (Re) debe estar siempre por encima de 4000 para garantizar un caudal turbulento.

VI.10.1. Materiales para diseño de reactores.

En el reactor el fluido debe estar expuesto a la radiación solar UV, el material del reactor debe ser transparente (o translúcido) a la luz solar. Estas particularidades dependen del tipo de superficie reflectiva que se usa para ayudar en la captación de fotones, o si ésta es necesaria o no (colectores sin concentración) y, por último, de la forma en que circule el fluido a través del reactor). Los componentes básicos que van a definir por tanto un reactor para aplicaciones fotocatalíticas van a ser el reflector (que puede ser concentrador o no) y el material del propio reactor (normalmente tubular).

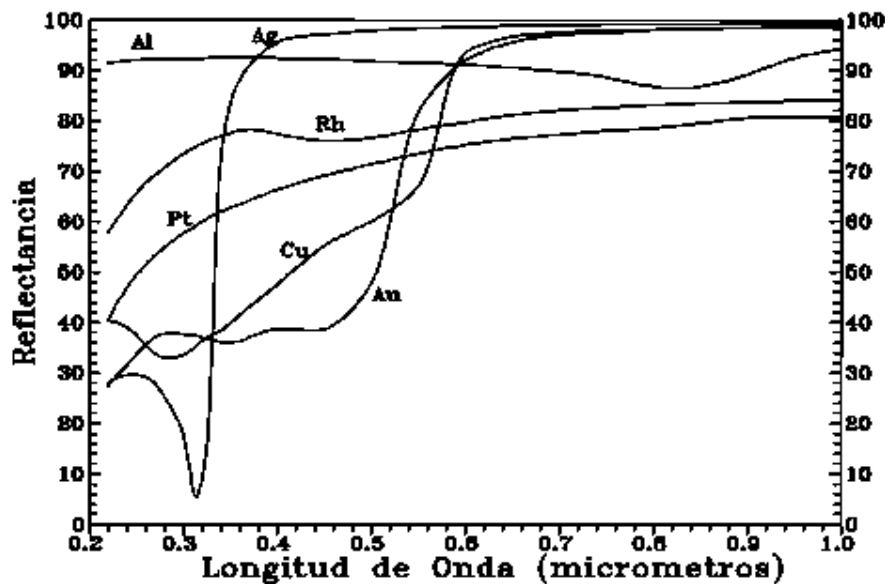


Figura 7. Reflectancia espectral de diferentes metales electro-depositados al vacío

VI.10.1.1. Superficie reflectante.

Superficie que tiene por objeto dirigir y reflejar la luz útil hacia el reactor para conseguir un máximo aprovechamiento de ésta y evitar pérdidas innecesarias, debiendo estar compuesta por un material que sea altamente efectivo para la reflexión de la radiación ultravioleta. Los

espejos tradicionales basados en plata tienen una elevada reflectividad (radiación reflejada/radiación incidente) en el visible, pero no así en el intervalo de longitudes de onda entre 300 y 400 nm, siendo la mejor opción en este caso la utilización de espejos a base de aluminio (Figura 7). Además, el vidrio utilizado normalmente como cubierta protectora de los espejos convencionales no es adecuado ya que absorbe también parte de la radiación UV que lo atraviesa, lo que ocurre doblemente ya que la luz lo traspasa dos veces en su camino, hacia y desde la superficie metalizada.

VI.10.1.2. Fotorreactor.

Con respecto a los materiales válidos como reactores para procesos de fotocatalisis, la necesidad de tener una elevada transmisividad en el UV y una elevada resistencia a la degradación hace la elección limitada. Entre las alternativas se encuentran los fluoropolímeros (inertes químicamente, con buena transmisividad y resistencia y buenos difusores de luz UV), materiales acrílicos y varios tipos de vidrio (necesariamente con bajo contenido en hierro ya que este absorbe UV). El cuarzo es también un material excelente pero muy costoso, lo que lo invalida desde un punto de vista práctico (Figura 8).

La utilización de materiales plásticos puede ser una opción ya que existen diversos materiales (politetrafluoretileno, etileno-tetrafluoretileno, etilpropileno fluorado, materiales acrílicos, etc) que pueden ser extruídos en forma tubular y poseen las características de trasmisividad y resistencia térmica, así como el mantenimiento de sus propiedades durante su uso a la intemperie. Sin embargo, una de sus desventajas es la necesidad de incrementar el espesor del material cuando se desea que el reactor soporte condiciones de presión. Esto puede suponer un problema cuando se desea impulsar el agua a través de colectores conectados en serie.

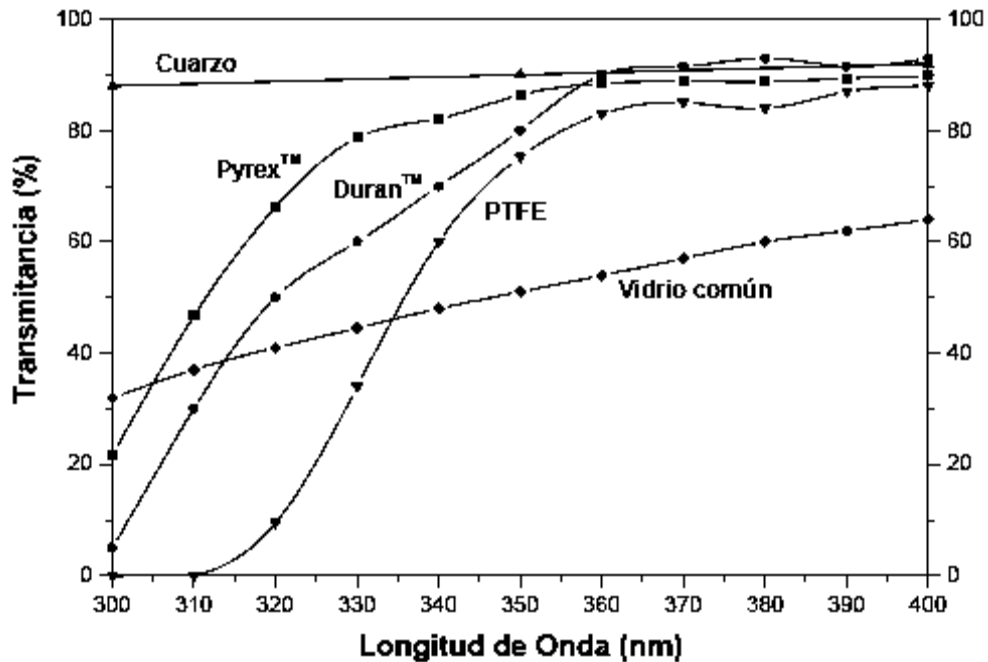


Figura 8. Transmittancia de diferentes materiales válidos para reactores fotocatalíticos.

Entre las diferentes configuraciones que puede adoptar el reactor la forma usual es el tubular debido a la sencillez de manejo del fluido. En estos casos uno de los parámetros más importantes es el diámetro del reactor ya que se ha de garantizar una adecuada relación entre la distribución de iluminación, la concentración de catalizador y la eficiencia del proceso fotocatalítico. Cuanto menor es la concentración de TiO_2 , menos opaca es la suspensión y mayor va a ser la penetración de la luz. Una concentración de 1 g L^{-1} de TiO_2 reduce la iluminación a cero después de solo 10 cm de trayectoria óptica, por lo que si el diámetro del tubo es superior sólo la parte exterior estará iluminada (Figura 9). Los valores prácticos para fotorreactores tubulares van a estar normalmente entre 25 y 50 mm.

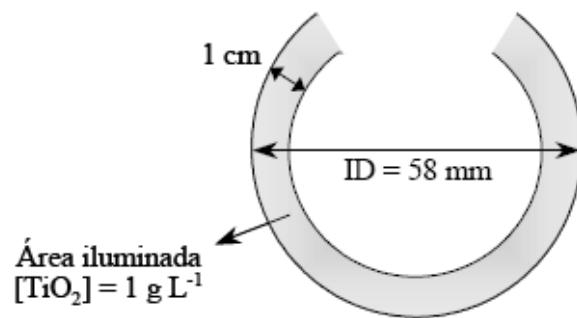


Figura 9. Zona de penetración de luz solar (sin concentrar) en un reactor tubular con una concentración de TiO_2 de 1 g L^{-1} (catalizador en suspensión).

Lo indicado anteriormente es también aplicable en el caso de considerar un reactor plano (horizontal o inclinado). Sin embargo el principal problema de este tipo de reactores es que suelen estar abiertos a la atmósfera, lo que origina la pérdida de contaminantes volátiles, transferencia de polvo y suciedad al líquido reaccionante, dificultades para enriquecer el agua en oxígeno cuando las cargas contaminantes son muy altas, etc.

VII. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de aguas residuales es de gran importancia para la mayoría de los países; se han utilizado métodos como la digestión biológica, oxidación química, entre otras para la eliminación de los microorganismos dañinos o contaminantes industriales provenientes de las efluentes.

Sin embargo, estos métodos no son tan eficientes como se desea, por lo cual hace posible la búsqueda de nuevas tecnologías encaminadas a la resolución de este problema como la utilización de la fotocatalisis con luz y un semiconductor (TiO_2) como catalizador.

La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de aguas de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado, en la última década, al desarrollo de nuevas tecnologías que sean un complemento de los procedimientos convencionales (en especial el tratamiento biológico), que se han tornado inadecuados para alcanzar los grados de pureza requeridos por las legislaciones pertinentes.

El presente trabajo tiene como finalidad degradar un colorante orgánico soluble en agua, utilizado en la industria textil como el: AZUL 1; mediante una reacción fotocatalítica utilizando como catalizador el óxido de titanio.

VIII. OBJETIVO GENERAL.

Probar la actividad fotocatalítica en la oxidación y mineralización de una disolución del colorante Azul 1 en presencia de TiO_2 y luz UV.

IX. OBJETIVO PARTICULAR.

Obtener la velocidad de oxidación del colorante a diferentes concentraciones de colorante y catalizador empleado.

NOTA: Alguno de los datos reportados en el presente trabajo también serán reportados en la tesis doctoral del M.C. José Apolinar Cortés.

X. HIPÓTESIS.

En distintas investigaciones se han reportado estudios en los que se afirma que los procesos avanzados de oxidación pueden ser utilizados para eliminar compuestos cromóforos orgánicos presentes en las aguas residuales municipales y/o industriales en las cuales, éstos compuestos son considerados como contaminantes. Ahora bien, algunas descargas residuales contienen color, si los compuestos cromóforos que le dan esta característica son orgánicos, los POAs deben ser capaces de eliminarlos, degradando las moléculas responsables del color.

XI. DESARROLLO DEL TRABAJO.

El proceso que se utilizó es el Proceso de Oxidación Avanzada (POA), desarrollado en un prototipo de reactor heterogéneo. El catalizador utilizado es el dióxido de titanio (TiO_2) en polvo Degussa® P25 con un área superficial de $50 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, de 70% anatasa y 30% rutilo con una tamaño de partícula alrededor de los 25 nm. La fuente de energía utilizada para la activación del catalizador es una lámpara de luz ultravioleta de 6 watts nominales de potencia modelo F6T5BLB, marca Tecnolite, con una intensidad de 5 mW cm^{-2} a 363 nm. Se utilizó un compuesto modelo como sistema de evaluación de la actividad fotocatalítica, el cual es el colorante azul 1, que contiene grupos cromóforos que absorben en 630, 410 y 310 nm; además de ser considerado representativo del agua residual de la industria textil.

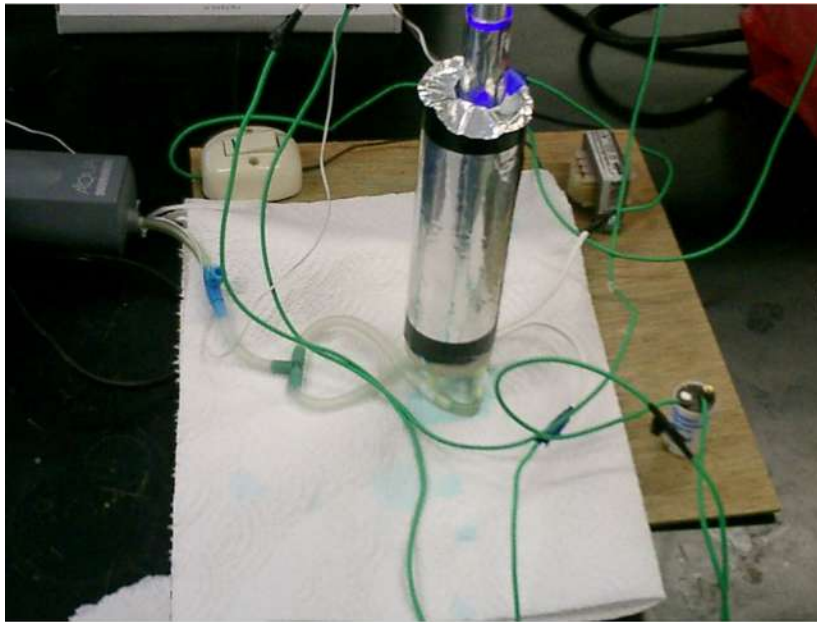


Figura 10. Reactor diseñado.

XI.1. Características del reactor.

El volumen del prototipo de reactor es de aproximadamente 150 mililitros. El cuerpo del reactor es de cuarzo, en forma tubular colocado verticalmente, con la fuente de iluminación de luz ultravioleta en el centro del tubo. En el espacio anular formado entre la lámpara y el tubo, se colocó la solución de azul 1 y el TiO_2 en polvo. Para promover el proceso de oxidación y

evitar la sedimentación del catalizador, se burbujeó aire con una bomba de capacidad de 1200 cm³/min. Las características del sistema de reacción se muestran en las figuras 14 y 15.

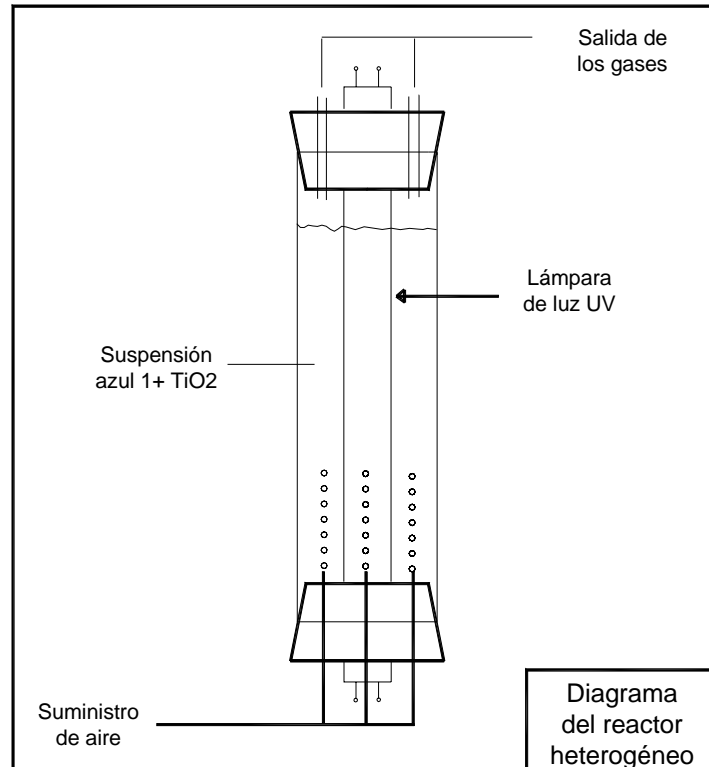


Figura 11. Diagrama del sistema de reacción.

Para determinar el efecto de las variables; concentración de colorante, concentración de contaminante y fuente de radiación, se generó un diseño de experimentos para el desarrollo de las pruebas experimentales en el que se varían las concentraciones de TiO₂ y azul 1 en diferentes proporciones, comparadas cada una de ellas con un blanco (prueba de oxidación del azul 1 con luz UV pero en ausencia de TiO₂):

- Se corrieron tres pruebas manteniendo constante la concentración de TiO₂ (150 ppm) y variando la concentración de azul 1 (12.5, 25 y 50 ppm).
- Se corrieron dos pruebas variando la concentración de TiO₂ (150 y 300 ppm) y manteniendo constante la concentración de azul 1 (50 ppm).
- Se corrieron tres pruebas variando la concentración de TiO₂ (150, 300 y 450 ppm) y la de azul 1 (12.5, 25 y 50 ppm).

El seguimiento del grado de oxidación se llevó a cabo evaluando la concentración en forma indirecta por medio de un espectrofotómetro UV-vis, modelo lambda 2, marca Perkin Elmer. Los muestreos se realizaron cada 30 minutos, para posteriormente analizarlas en el espectro. Los espectros obtenidos en los diferentes muestreos se convirtieron a concentración por medio de una curva de calibración; la curva de calibración se construyó calculando el área bajo la curva del pico principal (entre 500 y 700 nm) del espectro del azul 1.



XI.2. Diseño del experimento.

Para determinar el efecto de las variables; concentración de colorante, concentración de contaminante y fuente de radiación, se generó un diseño de experimentos para el desarrollo de las pruebas.

Tabla V. Programa de pruebas

| TiO ₂ Azul 1 | 150 ppm | 300 ppm | 450 ppm | - |
|----------------------------|------------|------------|------------|--------|
| 12.5 ppm | Prueba (A) | - | - | - |
| 25 ppm | Prueba (B) | - | - | - |
| 50 ppm | Prueba (C) | Prueba (D) | - | Blanco |
| 75 ppm | - | - | Prueba (E) | - |
| | Blanco | - | - | Blanco |

XII. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

Se prepararon diluciones del colorante azul 1 a diferentes concentraciones y se analizaron en el espectrofotómetro UV-vis, para elaborar una curva de calibración y obtener las concentraciones de nuestros experimentos a diferentes tiempos.

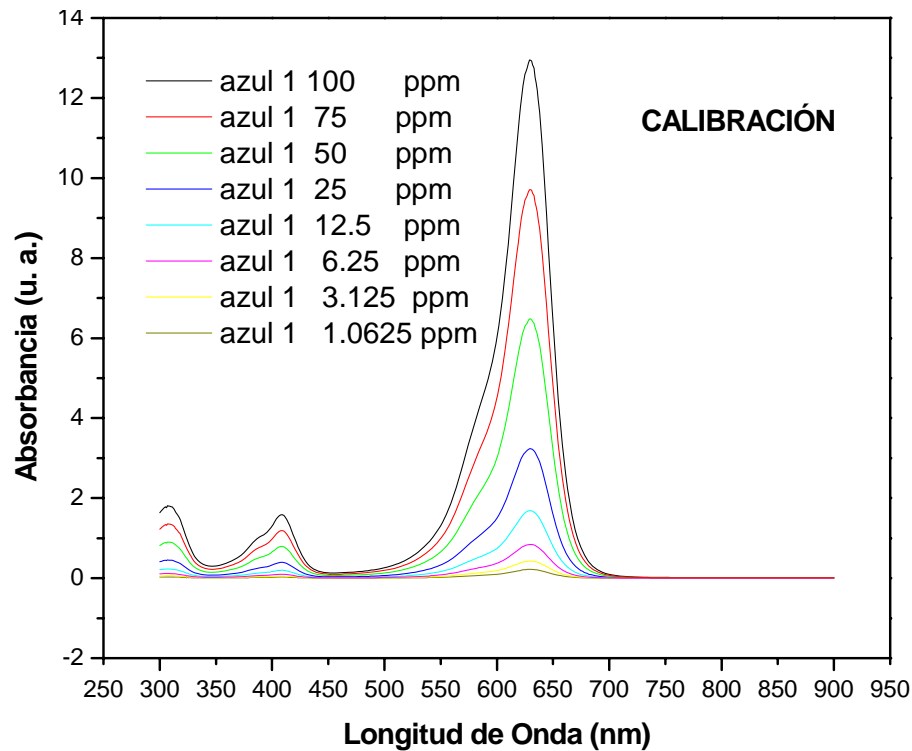


Figura 13. Espectros de concentración conocida

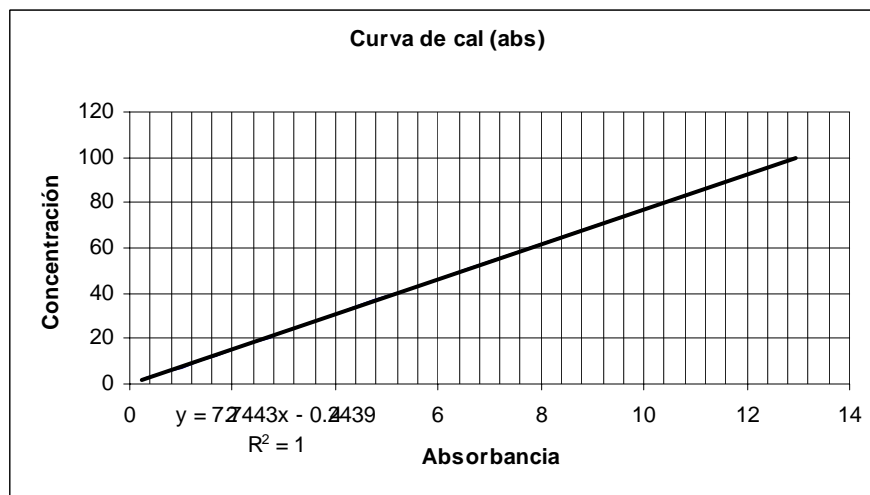


Figura 14. Curva de calibración

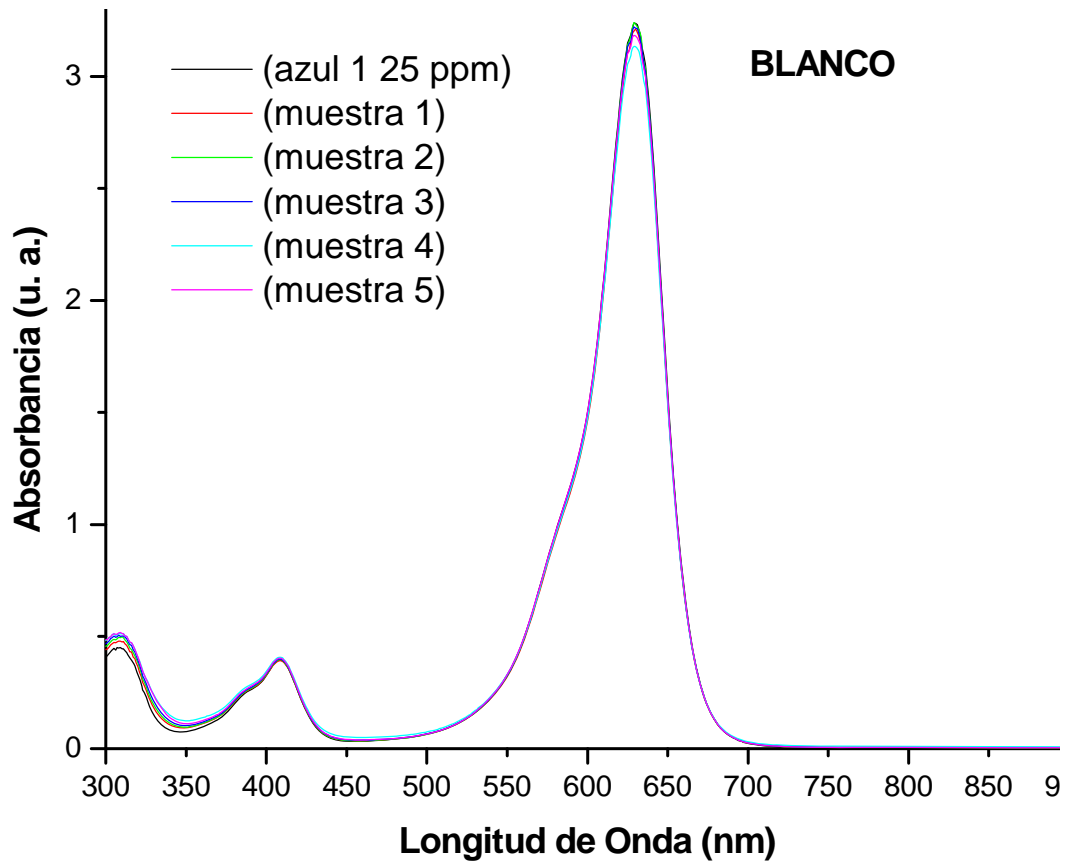


Figura 15. Espectro de cada muestra de la prueba sin la presencia de TiO_2

Para determinar el grado de oxidación que se alcanza exclusivamente por la radiación ultravioleta en ausencia de catalizador, se corrió una prueba denominada blanco (figura 15), para que a la hora de realizar los análisis correspondientes no considerar éste efecto.



Figura 16. Efecto de la radiación UV en el colorante sin TiO_2 .

Después de tomar muestras durante 2 horas y media se puede observar que no hay algún cambio considerable.

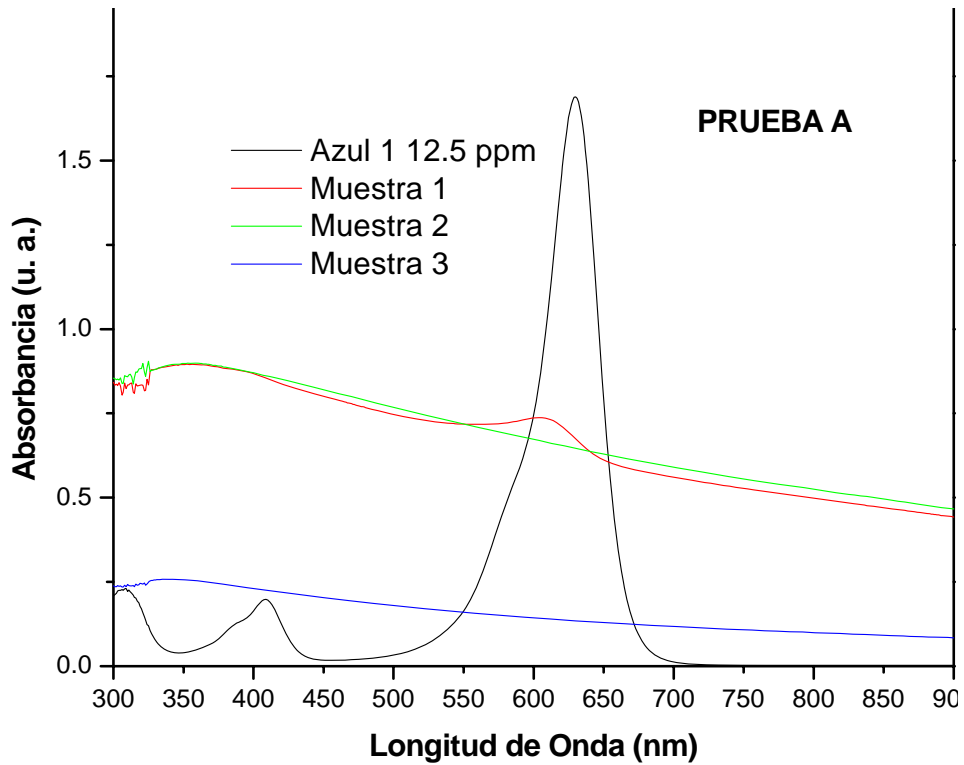


Figura 17. Espectro de cada muestra de la prueba A.

La primera serie de pruebas se corrió considerando constante la cantidad de TiO_2 en polvo suministrado al reactor y variando las concentraciones de colorante. La serie consta de las pruebas (A), (B) y (C), en donde las concentraciones iniciales de colorante fueron 12.5, 25 y 50 mg L^{-1} respectivamente, con una dosis de TiO_2 de 150 mg L^{-1} .

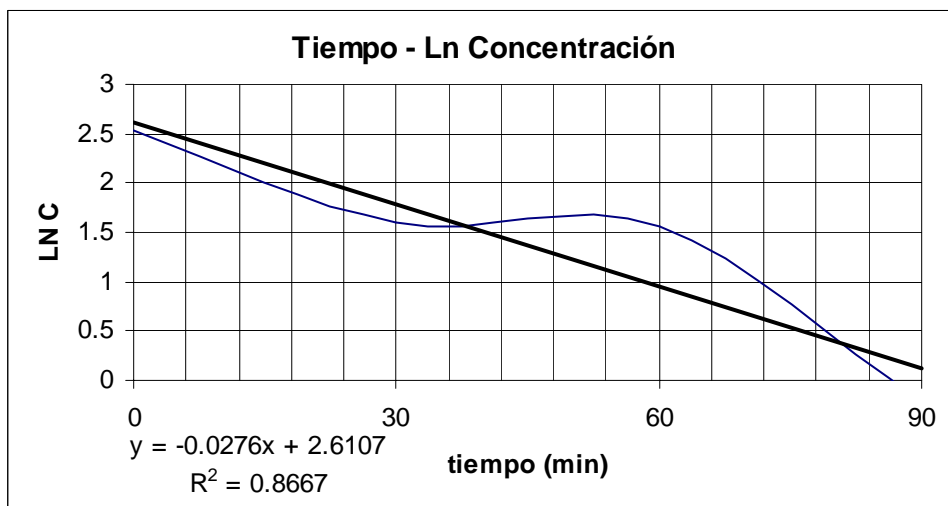


Figura 18. Velocidad de oxidación de la prueba A



Figura 19. Efecto de la radiación UV en la prueba A.

El tiempo de eliminación del colorante azul 1 se dio a 1.5 horas después de su exposición en el reactor a la radiación UV y TiO₂.

Para la prueba B se tiene que después de 2.5 hrs de reacción se elimina el color de la solución.

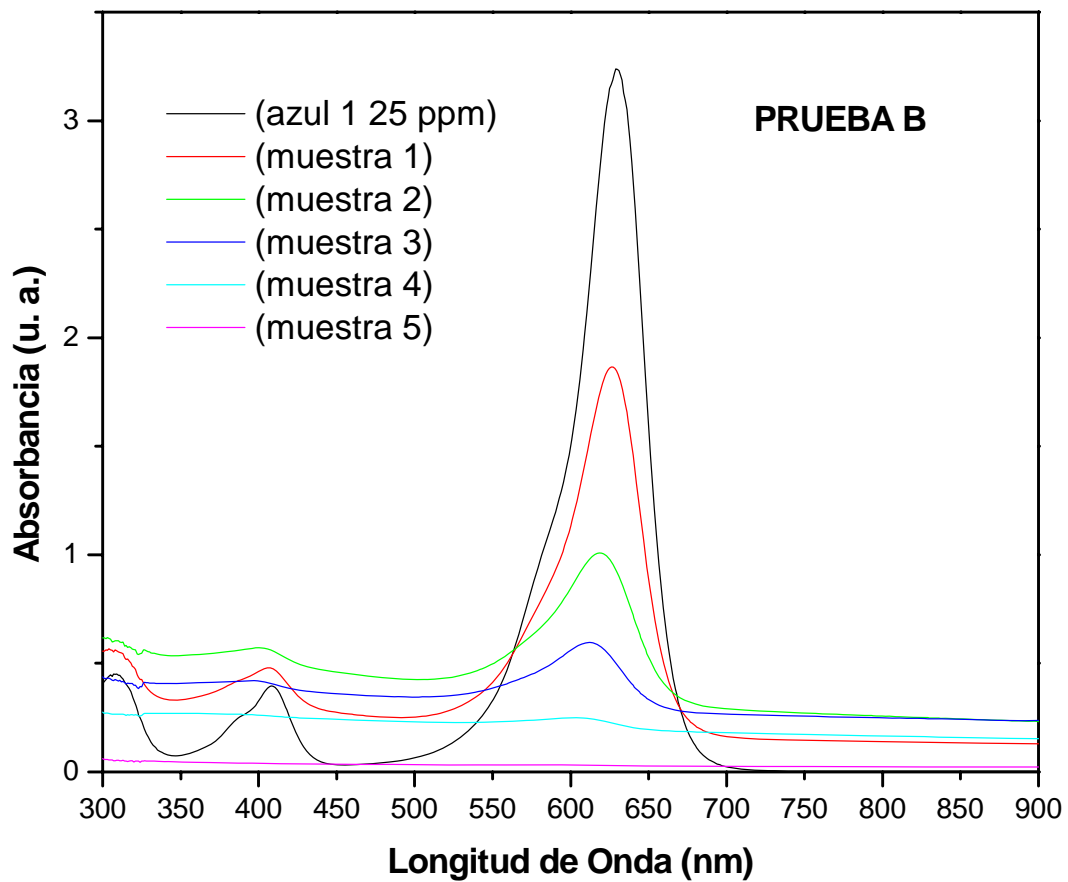


Figura 20. Espectro de cada muestra de la prueba B.

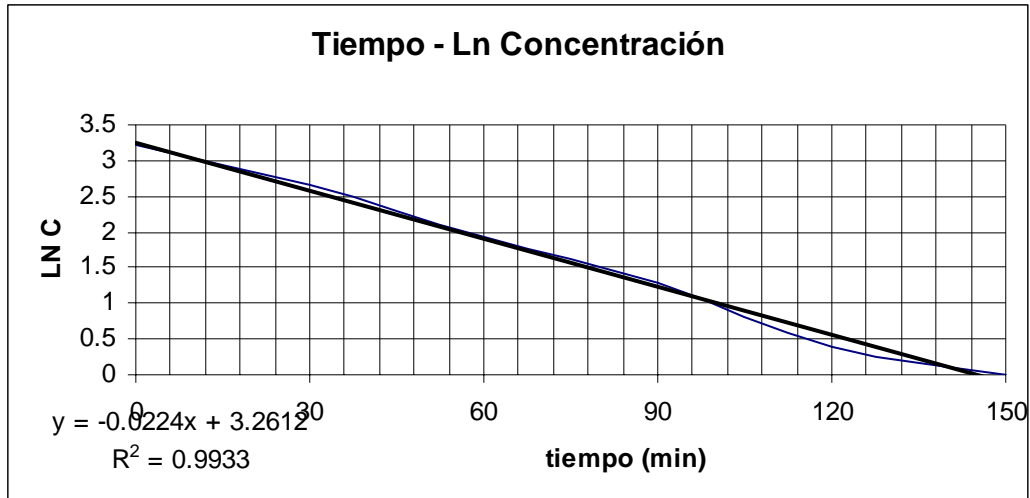


Figura 21. Velocidad de oxidación de la prueba B

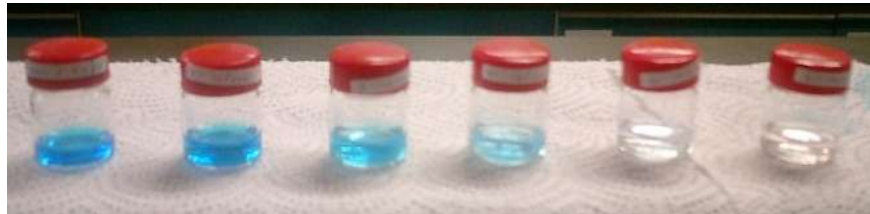


Figura 22. Efecto de la radiación UV en la prueba B.

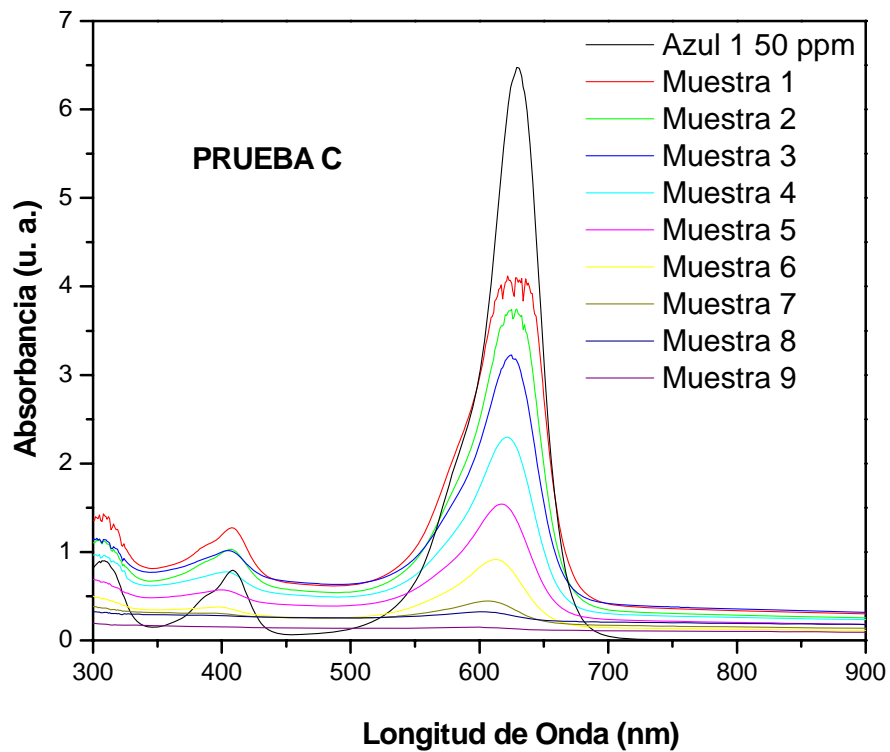


Figura 23. Espectro de cada muestra de la prueba C

Para el caso de la prueba C, el tiempo con respecto a la prueba B, se incrementó 2 horas. Es decir, el tiempo que tardó en eliminarse el color fue de 4.5 horas.

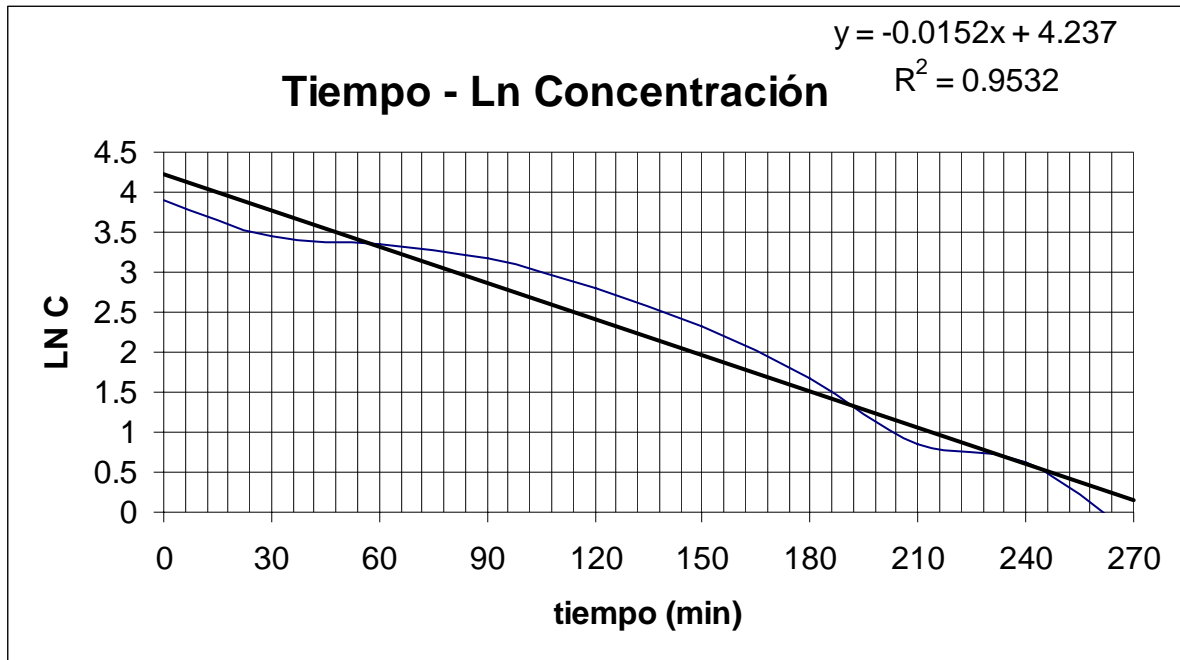


Figura 24. Velocidad de oxidación de la prueba C



Figura 25. Efecto de la radiación UV en la prueba C.

En base a los resultados obtenidos se observa que al aumentar la concentración de azul 1 a 25 ppm el tiempo de eliminación del color se incrementa 1 hr (2.5 hrs) con respecto a la prueba B y con la concentración a 50 ppm se oxida después de 4.5 horas (3 más que en la prueba A) de exposición.

La segunda serie de pruebas se corrió considerando constante la concentración de colorante azul 1 en 50 mg L^{-1} , variando las concentraciones de TiO_2 . La serie consta de las pruebas (C) y (D), en donde las dosis de TiO_2 fueron 150 y 300 mg L^{-1} respectivamente.

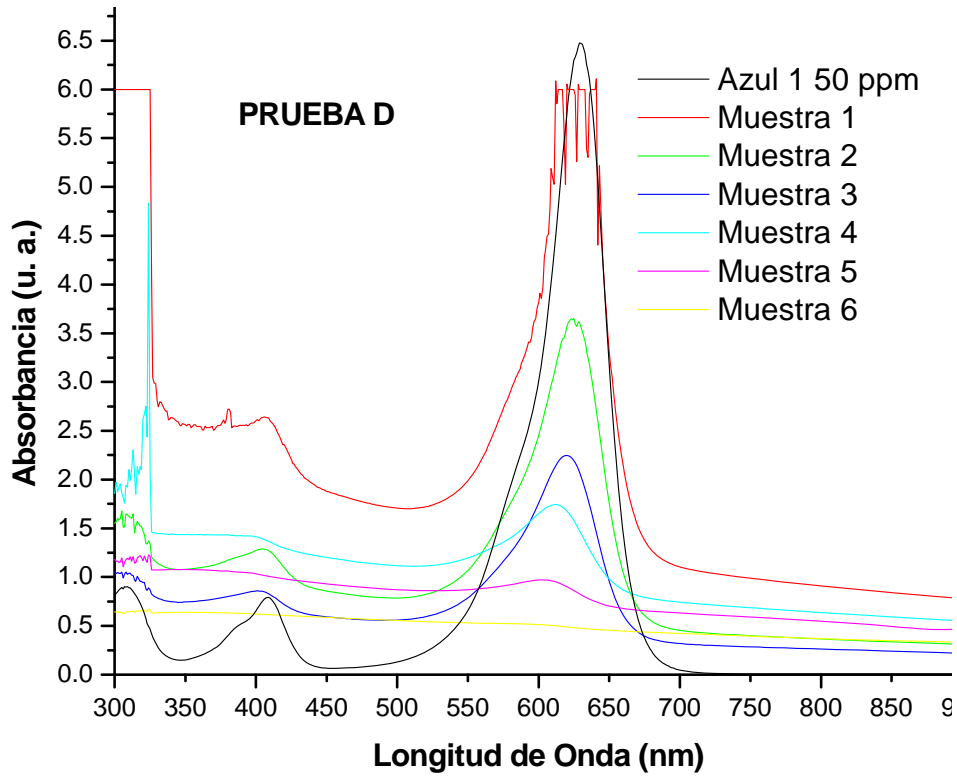


Figura 26. Espectro de cada muestra de la prueba D

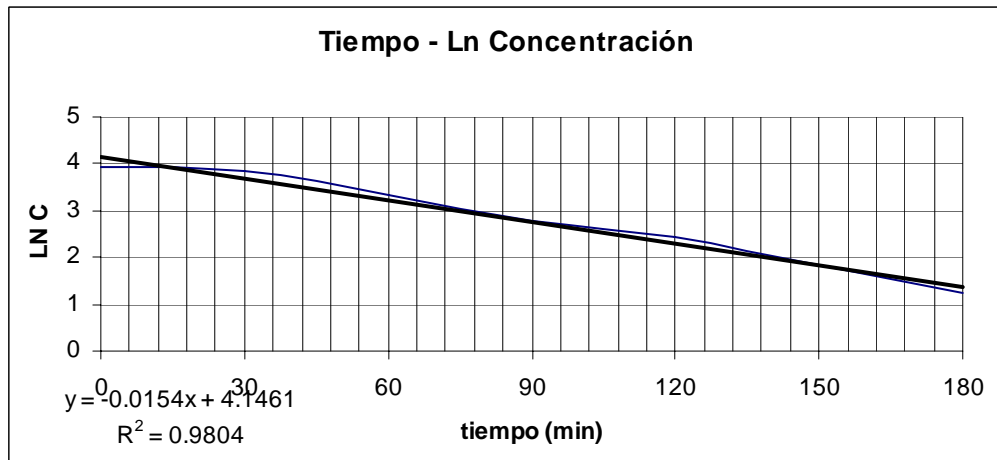


Figura 27. Velocidad de oxidación de la prueba D



Figura 28. Efecto de la radiación UV en la prueba D.

Como se observó anteriormente, la prueba C tardó 4.5 horas en eliminar los grupos cromóforos pero al acrecentar la concentración de catalizador, el tiempo de oxidación se dio 1.5 horas antes (3 hrs. de reacción).

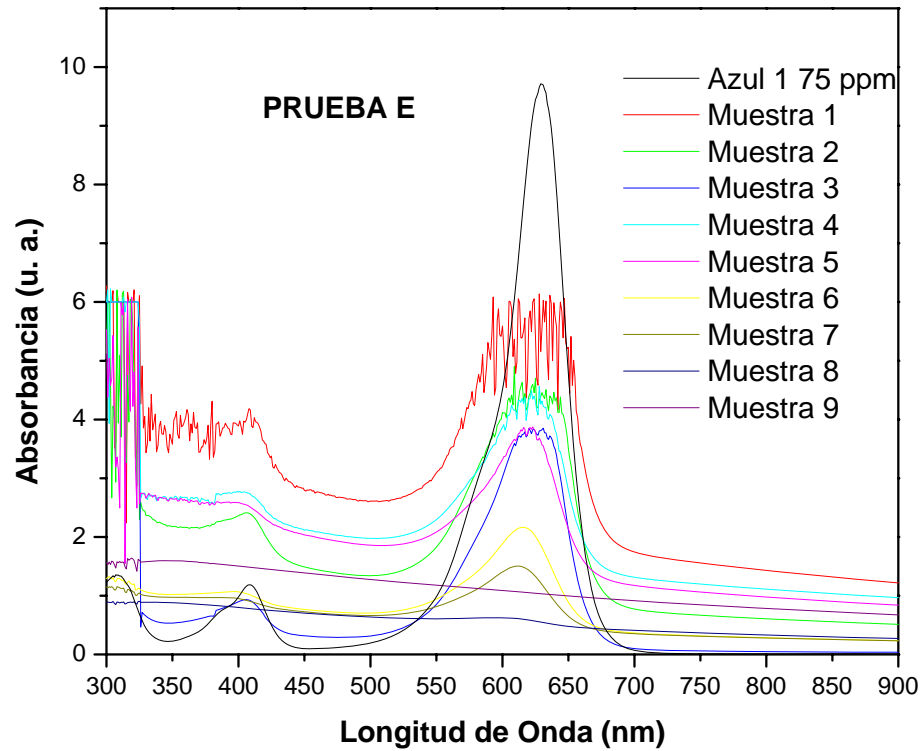


Figura 29. Espectro de cada muestra de la prueba E

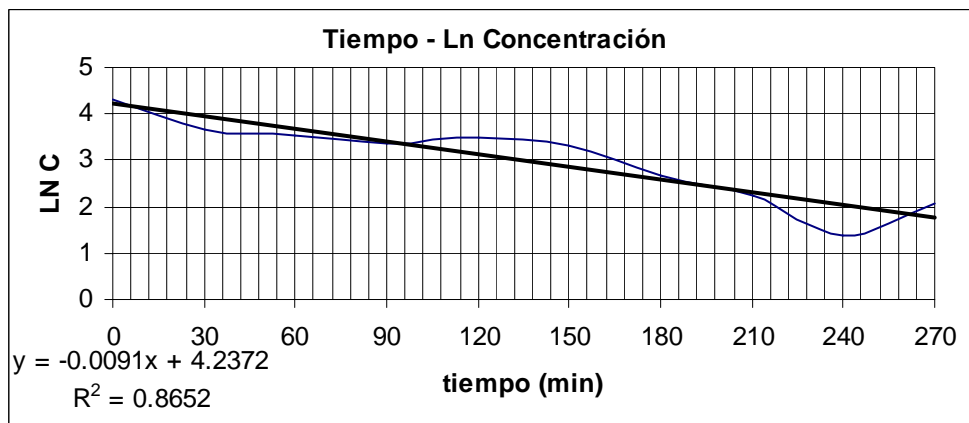


Figura 30. Velocidad de oxidación de la prueba E



Figura 31. Efecto de la radiación UV en la prueba E.

La tercera serie de pruebas se corrió variando en la misma proporción, las concentraciones de colorante azul 1 (25, 50 y 75 mg L⁻¹) y las concentraciones de TiO₂ (150, 300 y 450 ppm). La serie consta de las pruebas (B), (D) y (E).

Al incrementar de forma proporcional las concentraciones de catalizador y contaminante no se observa que el tiempo de exposición también sea proporcional. Aunque se esperaba que este tiempo se mantuviera igual al de la primer prueba. La prueba A tardó 1.5 hrs en aclararse en tanto que en la prueba D y E, 3 y 4.5 hrs., respectivamente.

Tabla VI. Constantes específicas de velocidad encontradas.

| Azul 1 \ TiO ₂ | 150 ppm | 300 ppm | 450 ppm | - |
|---------------------------|---------|---------|---------|--------|
| 12.5 ppm | 0.0276 | - | - | - |
| 25 ppm | 0.0224 | - | - | - |
| 50 ppm | 0.0152 | 0.0154 | - | Blanco |
| 75 ppm | - | - | 0.0091 | - |
| | Blanco | - | - | Blanco |

Todas las reacciones llevadas a lo largo del presente trabajo son del primer orden, por lo que podemos comparar todas las velocidades específicas de oxidación obtenidas para cada experimento. Hemos observado que si aumentamos la concentración del colorante al doble de la inicial (25 ppm), la velocidad de reacción va a disminuir en un 18.84% y al aumentar la concentración inicial de colorante, cuatro veces, se disminuye en un 32.14% más que el anterior, es decir, 44.93%.

Ahora bien, si lo que variamos es la concentración de catalizador al doble de la inicial, la velocidad de reacción se va a ver incrementada en un 1.29%, lo que nos indica que es despreciable el cambio en la concentración del catalizador para mejorar los rendimientos del este proceso.

Sin embargo, al variar de manera proporcional las concentraciones del catalizador y del colorante; primero, aumentando al doble las concentraciones iniciales encontramos que la velocidad se va a ver disminuida en un 31.25%, que es 0.89 puntos porcentuales menos de lo que se obtuvo cuando solo se varió la concentración de colorante. Y si incrementamos ambas concentraciones al cuádruple de la inicial, la velocidad anterior se incrementará en 9.66 puntos porcentuales, es decir, 40.91% y que es 4.02 puntos porcentuales menos de lo que se obtuvo cuando solo se varió la concentración de colorante

XIII. CONCLUSIONES.

1. El PAO - TiO₂/UV es más eficiente que el solo empleo de la luz UV y puede utilizarse para eliminar los grupos cromóforos (el color) presentes en las aguas residuales de la industria textil.
2. La velocidad de desaparición de los grupos cromóforos es inversamente proporcional a la concentración inicial de éstos, pero de una forma más marcada que con el cambio de concentración del catalizador. Para 12.5 ppm de azul 1 se encontró que la constante específica de velocidad de reacción (k) es 0.0276 s⁻¹ y para 50 ppm, 0.0152 s⁻¹. Una disminución del 55.07 %.
3. La velocidad de desaparición de los grupos cromóforos es directamente proporcional a la concentración inicial del TiO₂, pero su cambio es mínimo. Velocidad para 150 y 300 ppm de TiO₂, k es de 0.0152 s⁻¹ y 0.0154 s⁻¹, respectivamente.
4. Al variar de forma proporcional las concentraciones de azul 1 y TiO₂, se nota el efecto más importante que es el de la concentración del colorante quedando demostrado por los cambios tan marcados en las constantes específicas de velocidad de reacción indicadas en los puntos anteriores.

XIV. RECOMENDACIONES.

Los datos obtenidos en el presente trabajo, son la base que hace vislumbrar nuevas formas de proceder para el tratamiento de efluentes residuales con cargas de compuestos cromóforos provenientes de la industria textil, quedando en claro, que es necesario ampliar el conocimiento de esta técnica y mejorarla para su aplicación en forma práctica, como alternativa en el tratamiento de las descargas.

XV. SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.

- Anclaje del catalizador sobre un soporte inerte,
- Agregado de alguna especie metálica(dopado con iones) para minimizar la combinación
- Uso de agentes oxidantes como aceptores de electrones para la banda de conducción.
- Diseño de reactores que permitan el aprovechamiento máximo de una fuente luminosa.
- Uso de energía solar en combinación con la lámpara de UV.

XVI. BIBLIOGRAFÍA.

1. MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO. 7ª Edición (Español). Perry R.H. y Chilton, Editorial McGraw-Hill. 2001.
2. TÉCNICAS DE DEFENSA DEL MEDIO AMBIENTE. VOL. I Y II. Lora Soria, F. y Miró Chavarria, J. Editorial Labor. 1978.
3. INGENIERÍA AMBIENTAL. Henry, J. G. y Heinke, G. W. Editorial Prentice-Hall. 1999.
4. INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA QUÍMICA
5. MANUAL DE TRATAMIENTOS DE LOS RESIDUOS TÓXICOS Y PELIGROSOS. Alsina, Jordi. Publicaciones de la Universidad de Barcelona. 1996.

XVII. REFERENCIAS

1. Plataforma solar de Almería. *Aplicación de la energía solar ultravioleta al tratamiento de la contaminación por compuestos no biodegradables*. 15-18
2. EPA Office of Compliance Sector Notebook, *Project: Profile of the Textile Industry*, <http://www.cluin.org/download/toolkit/textilsn.pdf> (1997).
3. C. O'Neill, F.R. Hawkes, D.L. Hawkes, N. Lourenço, H.M. Pinheiro y W. Delée, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 74, 1009 (1999).
4. M. Sankar, G. Sekaran, S. Sadulla y T. Ramasani, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 74, 337 (1999).
5. N. Athanasopoulos, "Biological Degradation of Wastes", Cap. 18. A.M. Martin Editor, Elsevier Applied Science, Essex, 1991.
6. N. Pagga y D. Brown, *Chemosphere*, 15, 479 (1986).
7. G.M. Shaul, C.R. Dempsey, K.A. Dostal y R.J. Lieberman, *Proc. 41st Industrial Waste Conference*, Purdue University, Ann Arbor Sci. Publishers, Ann Arbor, 1987.
8. "Water Treatment Handbook, Degremont", 6a Edición. Editorial Lavoisier Publishing, Paris (1991).
9. O. Legrini, E. Oliveros y A.M. Braun, *Chem. Rev.*, 93, 671-698 (1993).
10. C.P. Huang, Ch. Dong y Z. Tang, *Waste Management*, 13, 361-377 (1993).
11. US/EPA *Handbook of Advanced Photochemical Oxidation Processes*, EPA/625/R-98/004 (1998).
12. *The AOT Handbook*, Calgon Carbon Oxidation Technologies, Ontario (1996).
13. J.R. Bolton y S.R. Cater, "Aquatic and Surface Photochemistry", 467-490. G.R. Helz, Zepp y D.G. Crosby Editores. Lewis, Boca Raton, FL, EEUU (1994).
14. W.H. Glaze, *Environ. Sci. Technol.*, 21, 224-230 (1987).
15. W.H. Glaze, J.W. Kang y D.H. Chapin, *Ozone Sci. & Technol.*, 9, 335-352 (1987).
16. B. Deng, D.R. Burris y T.J. Campbell, *Environ. Sci. Technol.*, 33, 2651-2656 (1999).
17. N. Deng, F. Luo, F. Wu, M. Xiao y X. Wu, *Wat. Res.*, 34, 2408-2411 (2000).
18. V.K. Sharma, W. Rivera, V.N. Joshi, F.J. Millero y D.O'Connor, *Environ. Sci. Technol.*, 33, 2645-2650 (1999).
19. J.P. Scott y D.F. Ollis, *Environ. Progress*, 14, 88-103 (1995).

20. *The AOT Handbook*, Calgon Carbon Oxidation Technologies, Ontario (1996).
21. J. Blanco, S. Malato, D. Bahnemann, D. Bockelman, D. Weichgrebe, F. Carmona y F. Martínez, *Proceedings of 7th Inter. Symp. on Solar Thermal Conc. Tech.*, IVTAN Ed. ISBN 5-201-09540-2, 540-550, Moscow, Russia, (1994).
22. D.F. Ollis, *Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy*, 593-622. Kluwer Academic Publishers (1991).
23. J. Perkowski, L. Koz y S. Ledakowics, *Ozone Sci. Eng.*, 18, 73 (1996).
24. I. Arslan, I. Akmehmet y T. Tuhkanen, *Environ. Technol.*, 20, 921 (1999).
25. K.H. Gregor, *Melliand*, 79, E 176 (1998).
26. E. Balanosky, J. Fernandez, J. Kiwi y A. Lopez, *Wat. Sci. Technol.*, 40, 417 (1999).
27. C. Galindo, P. Jacques y A. Kalt, *J. Photochem. Photobiol. A:*, 130, 35 (2000).
28. F. Zhang, J. Zhao, T. Shen, H. Hidaka, E. Pelizzetti y N. Serpone, *Appl. Catal. B: Environ.*, 15, 147 (1998).
29. Y. Wang, *Wat. Res.*, 34, 990 (2000).
30. F. Kiriakidou, D.I. Condarides y X.E. Verykios, *Catal. Today*, 54, 119 (1999).
31. K. Tennakone, C.T.K. Tilakaratne e I.R.M. Kottegoda, *J. Photochem. Photobiol. A*, 87, 177 (1995).
32. H. Tada y H. Honda, *J. Electrochem. Soc.*, 10, 3438 (1995).
33. K. Vinodgopal, I. Vedja y P. Kamat, *Chem. Mater.*, 43, 2180 (1996).
34. J. Blanco y S. Malato, ISBN 84-8108-106-X. Editorial Instituto de Estudios Almerienses, Almería 1996.
35. J. Rodríguez, M. Gomez, S.-E. Lindquist y C.G. Granqvist, *Thin Solid Films*, 360, 250 (2000).
36. M.R. Hoffmann, S.T. Martin, W. Choi y D.W. Bahnemann, *Chem. Rev.*, 95, 69 (1995).
37. M.I. Litter y J.A. Navío, *J. Photochem. Photobiol. A*, 98, 171 (1996).
38. K. Vinodgopal, I. Vedja y P. Kamat, *Chem. Mater.*, 43, 2180 (1996). D.Y. Goswami, *Adv. Solar Energy*, 10 165 (1995)
39. R.L. Pozzo, M.A. Baltanás y A.E. Cassano, *Catal. Today*, 54, 349 (1999).
40. O. Legrini, E. Oliveros y A.M. Braun, *Chem. Rev.*, 93, 671-698 (1993).
41. *The AOT Handbook*, Calgon Carbon Oxidation Technologies, Ontario (1996).
42. A. Mills y S. Le Hunte, *J. Photochem. Photobiol. A*, 108, 1-35 (1997).

43. S. Malato y J. Blanco. *Tecn. Solar apl. a la depuración de agua conteniendo plaguicidas*. 37 – 38
44. L. F. Garcés Giraldo, E. A. Mejía Franco, J. L. Santamaría Arango. *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. 84-87.
45. X. Domènech, *Rev. Metal.*, 23, 341 (1987). U. Siemon, D. Bahnemann, J.J. Testa, D. Rodríguez, M.I. Litter y N. Bruno, *J. Adv. Oxid. Technol.*, 5, 1- 9 (2000).
46. L. Spanhel, H. Weller y A. Henglein, *J. Am. Chem. Soc.*, 109, 6632 (1987).
47. M. Hoffmann, S. Martin, W. Choi y D. Bahnemann, *Chem.Rev.*, 95, 69-96 (1995).
48. I. Muñoz Ortiz. *Life cycle assesment as a tool for green chemistry: Aplicacion to different advanced oxidation processes for wasterwater treatment*. 35-60. 2006.
49. M. Romero, J. Blanco, B. Sánchez, A. Vidal, S. Malato, A.I. Cardona y E. García, *Solar Energy*, 66(2), 169-182 (1999).
50. D. Curco, S. Malato, J. Blanco y J. Giménez, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 44, 199-217 1996).
51. J. Giménez, D. Curcó y M.A. Queral, *Catalysis Today*, 54, 229-244 (2000).
52. P.S. Mukherjee y A.K. Ray, *Chem. Eng. Technol.*, 22, 253-260 (1999).
53. M. Anpo y H. Yamashita, *Wiley Ser. Photosci. Photoeng.*, 1 (Surface Photochemistry), 117-164 (1996).

XVIII. GLOSARIO

Absorbancia. Logaritmo de la relación entre la intensidad de una radiación antes y después de atravesar un medio absorbente.

Absorción. Penetración o impregnación de un material sólido por un líquido o un gas. La absorción de la luz consiste en la captura de fotones de energía $E = h\nu$.

Constante de velocidad. Factor de proporcionalidad en la ecuación o ley de velocidad de una reacción química.

Espectro. Rango de energía electromagnética organizado en orden creciente o decreciente de longitud de onda o frecuencia.

Longitud de onda. Propiedad característica de la luz, similar a su color, y equivalente a la longitud de la onda completa entre cresta y cresta consecutivas. Se expresa en nm o en Å.

Oxidación avanzada. Uno de varios procesos de oxidación combinados. Procesos de oxidación química avanzados que usan oxidantes (químicos) para reducir los niveles de COD/BOD, y para eliminar compuestos inorgánicos y orgánicos oxidables. **Oxidación ultravioleta.** Un proceso que usa longitud de onda extremadamente corta que puede matar microorganismos (desinfección) o partir moléculas orgánicas (foto oxidación) dejándolas polarizadas o ionizadas y así son eliminadas más fácilmente del agua.

Tratamiento de agua avanzado. Es el nivel de tratamiento de aguas que requiere una reducción del 85 por ciento en la concentración del agente contaminador, también conocido como tratamiento terciario.

UV. Ultra Violeta. Radiación que contiene una longitud de onda menor que la luz visible. Es a menudo usada para matar bacterias y romper el ozono.

XIX. APÉNDICE

a) **Datos obtenidos para la curva de calibración a partir de los espectros a concentración conocida.**

| Long. | MUESTRAS (ppm) | | | | | | |
|-----------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1.5625 | 3.125 | 6.25 | 12.5 | 25 | 50 | 100 |
| 900.00000 | -0.00010 | 0.00225 | 0.00059 | 0.00209 | 0.00298 | 0.00607 | 0.01487 |
| 880.00000 | -0.00014 | 0.00246 | 0.00050 | 0.00197 | 0.00324 | 0.00612 | 0.01474 |
| 860.00000 | 0.00005 | 0.00257 | 0.00064 | 0.00216 | 0.00346 | 0.00630 | 0.01482 |
| 840.00000 | 0.00037 | 0.00277 | 0.00085 | 0.00239 | 0.00344 | 0.00621 | 0.01464 |
| 820.00000 | 0.00063 | 0.00320 | 0.00120 | 0.00256 | 0.00322 | 0.00592 | 0.01468 |
| 800.00000 | 0.00073 | 0.00322 | 0.00113 | 0.00253 | 0.00305 | 0.00566 | 0.01446 |
| 780.00000 | 0.00060 | 0.00310 | 0.00113 | 0.00259 | 0.00322 | 0.00598 | 0.01496 |
| 760.00000 | 0.00041 | 0.00289 | 0.00098 | 0.00260 | 0.00342 | 0.00654 | 0.01640 |
| 740.00000 | 0.00033 | 0.00287 | 0.00112 | 0.00290 | 0.00440 | 0.00834 | 0.02085 |
| 720.00000 | 0.00069 | 0.00338 | 0.00199 | 0.00457 | 0.00780 | 0.01497 | 0.03653 |
| 700.00000 | 0.00169 | 0.00532 | 0.00584 | 0.01239 | 0.02381 | 0.04654 | 0.10846 |
| 680.00000 | 0.00754 | 0.01684 | 0.02883 | 0.05939 | 0.12010 | 0.23634 | 0.52906 |
| 660.00000 | 0.04551 | 0.09106 | 0.17664 | 0.35665 | 0.72091 | 1.38890 | 2.87327 |
| 640.00000 | 0.17901 | 0.35303 | 0.69255 | 1.38639 | 2.73459 | 3.81721 | 3.90059 |
| 620.00000 | 0.18839 | 0.37164 | 0.72887 | 1.46008 | 2.87329 | 3.85106 | 3.90407 |
| 600.00000 | 0.09551 | 0.18966 | 0.37021 | 0.74478 | 1.50128 | 2.82716 | 3.92425 |
| 580.00000 | 0.06145 | 0.12263 | 0.23779 | 0.47846 | 0.96386 | 1.83545 | 3.56873 |
| 560.00000 | 0.03124 | 0.06330 | 0.12027 | 0.24208 | 0.48581 | 0.92156 | 1.87725 |
| 540.00000 | 0.01505 | 0.03143 | 0.05721 | 0.11503 | 0.23013 | 0.43551 | 0.89000 |
| 520.00000 | 0.00786 | 0.01714 | 0.02900 | 0.05835 | 0.11629 | 0.21861 | 0.44493 |
| 500.00000 | 0.00463 | 0.01069 | 0.01626 | 0.03276 | 0.06469 | 0.12072 | 0.24572 |
| 480.00000 | 0.00315 | 0.00805 | 0.01088 | 0.02186 | 0.04277 | 0.07924 | 0.16104 |
| 460.00000 | 0.00280 | 0.00698 | 0.00871 | 0.01745 | 0.03318 | 0.06149 | 0.12471 |
| 440.00000 | 0.00378 | 0.00893 | 0.01224 | 0.02432 | 0.04663 | 0.08838 | 0.18435 |
| 420.00000 | 0.01663 | 0.03417 | 0.06192 | 0.12465 | 0.24941 | 0.47742 | 0.99408 |
| 400.00000 | 0.02184 | 0.04431 | 0.08170 | 0.16363 | 0.32673 | 0.62045 | 1.26810 |
| 380.00000 | 0.01398 | 0.02858 | 0.05051 | 0.10059 | 0.19880 | 0.37712 | 0.77256 |
| 360.00000 | 0.00763 | 0.01612 | 0.02524 | 0.04998 | 0.09604 | 0.18163 | 0.37947 |
| 340.00000 | 0.00703 | 0.01463 | 0.02216 | 0.04339 | 0.08243 | 0.15563 | 0.33515 |
| 320.00000 | 0.02010 | 0.04254 | 0.08240 | 0.17058 | 0.32983 | 0.63108 | 1.35921 |
| 300.00000 | 0.02620 | 0.05491 | 0.10367 | 0.20814 | 0.40808 | 0.78356 | 1.69329 |

| CONCENTRACION | AREA | PICO | ANCHO | ABS. |
|---------------|-----------|------|-------|----------|
| 100 | 780.86691 | 629 | -47 | 12.95172 |
| 75 | 585.65018 | 629 | -47 | 9.71379 |
| 50 | 390.43345 | 629 | -47 | 6.47586 |
| 25 | 195.21673 | 629 | -47 | 3.23793 |
| 12.5 | 98.51871 | 630 | -45 | 1.68847 |
| 6.25 | 49.07642 | 630 | -45 | 0.84417 |
| 3.125 | 25.30663 | 630 | -45 | 0.42993 |
| 1.5625 | 12.70271 | 630 | -45 | 0.21819 |

b) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “BLANCO”.

| MUESTRAS BLANCO | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Long. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 700 | 0.02564 | 0.02573 | 0.02624 | 0.03115 | 0.02568 |
| 690 | 0.05194 | 0.05209 | 0.05254 | 0.05708 | 0.05193 |
| 680 | 0.11895 | 0.11963 | 0.11969 | 0.12329 | 0.11964 |
| 670 | 0.29014 | 0.29261 | 0.29191 | 0.29207 | 0.29224 |
| 660 | 0.70284 | 0.70981 | 0.70766 | 0.6984 | 0.70883 |
| 650 | 1.54455 | 1.56193 | 1.55676 | 1.52886 | 1.55908 |
| 640 | 2.67011 | 2.70379 | 2.69329 | 2.63088 | 2.68161 |
| 630 | 3.21052 | 3.23502 | 3.21438 | 3.13392 | 3.1817 |
| 620 | 2.82034 | 2.85467 | 2.84869 | 2.78818 | 2.84672 |
| 610 | 2.0338 | 2.06345 | 2.06378 | 2.03406 | 2.08045 |
| 600 | 1.46378 | 1.48593 | 1.48785 | 1.47163 | 1.50327 |
| 590 | 1.15959 | 1.17705 | 1.17818 | 1.16727 | 1.19021 |
| 580 | 0.93917 | 0.95311 | 0.9538 | 0.94632 | 0.96293 |
| 570 | 0.69723 | 0.70736 | 0.70839 | 0.70541 | 0.71553 |
| 560 | 0.47448 | 0.48111 | 0.4825 | 0.48399 | 0.48779 |
| 550 | 0.32135 | 0.32556 | 0.32683 | 0.33081 | 0.33026 |
| 540 | 0.22545 | 0.22815 | 0.22931 | 0.23509 | 0.23146 |
| 530 | 0.15977 | 0.16136 | 0.16248 | 0.16938 | 0.1636 |
| 520 | 0.11396 | 0.11487 | 0.11587 | 0.12375 | 0.11631 |
| 510 | 0.08374 | 0.084 | 0.08519 | 0.09379 | 0.08509 |
| 500 | 0.06376 | 0.06388 | 0.06511 | 0.0746 | 0.06505 |

| Tiempo (min) | Absorbancia | Concentración |
|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 3.23793 | 25 |
| 30 | 3.20141 | 24.54877946 |
| 60 | 3.2392 | 24.84143656 |
| 90 | 3.22006 | 24.69321066 |
| 120 | 3.13358 | 24.02348359 |
| 150 | 3.18195 | 24.39807539 |

- c) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “A”.

| MUESTRAS A | | | |
|------------|---------|---------|---------|
| Long. | 1 | 2 | 3 |
| 700 | 0.56073 | 0.59057 | 0.11787 |
| 690 | 0.5681 | 0.59785 | 0.12002 |
| 680 | 0.57598 | 0.60538 | 0.12237 |
| 670 | 0.58483 | 0.61311 | 0.12475 |
| 660 | 0.59588 | 0.62098 | 0.12709 |
| 650 | 0.6119 | 0.62909 | 0.12943 |
| 640 | 0.63741 | 0.63762 | 0.13199 |
| 630 | 0.67395 | 0.64638 | 0.13471 |
| 620 | 0.71207 | 0.65522 | 0.13746 |
| 610 | 0.73431 | 0.66402 | 0.14052 |
| 600 | 0.73632 | 0.67297 | 0.14335 |
| 590 | 0.72836 | 0.68189 | 0.14637 |
| 580 | 0.72142 | 0.69081 | 0.14959 |
| 570 | 0.71824 | 0.69992 | 0.15293 |
| 560 | 0.71733 | 0.70878 | 0.15638 |
| 550 | 0.71812 | 0.71844 | 0.15999 |
| 540 | 0.72034 | 0.72824 | 0.1637 |
| 530 | 0.72465 | 0.73757 | 0.1676 |
| 520 | 0.73082 | 0.74751 | 0.1715 |
| 510 | 0.73828 | 0.75744 | 0.17563 |
| 500 | 0.74692 | 0.7678 | 0.17984 |

| Tiempo (min) | Absorbancia | Concentración | Ln Conc. |
|--------------|-------------|---------------|-------------|
| 0 | 1.68847 | 12.5 | 2.52572864 |
| 30 | 0.67395 | 4.975370985 | 1.60449994 |
| 60 | 0.64638 | 4.761860634 | 1.56063848 |
| 90 | 0.13471 | 0.799334653 | -0.22397558 |

d) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “B”.

| MUESTRAS B | | | | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Long. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 700 | 0.16288 | 0.29089 | 0.26628 | 0.18066 | 0.02584 |
| 690 | 0.17771 | 0.29875 | 0.26923 | 0.18234 | 0.02611 |
| 680 | 0.21185 | 0.31317 | 0.27289 | 0.18433 | 0.02639 |
| 670 | 0.29522 | 0.3425 | 0.28113 | 0.18676 | 0.02663 |
| 660 | 0.49072 | 0.40517 | 0.29835 | 0.19016 | 0.0271 |
| 650 | 0.88971 | 0.52898 | 0.33368 | 0.19543 | 0.02746 |
| 640 | 1.45778 | 0.72284 | 0.39881 | 0.20464 | 0.02811 |
| 630 | 1.8394 | 0.91598 | 0.491 | 0.21942 | 0.02911 |
| 620 | 1.77896 | 1.00741 | 0.57314 | 0.23601 | 0.0301 |
| 610 | 1.45023 | 0.96103 | 0.59469 | 0.24732 | 0.03134 |
| 600 | 1.13322 | 0.84637 | 0.56038 | 0.24934 | 0.03204 |
| 590 | 0.92295 | 0.73799 | 0.50849 | 0.24537 | 0.03244 |
| 580 | 0.77582 | 0.65969 | 0.466 | 0.24003 | 0.03247 |
| 570 | 0.63762 | 0.59856 | 0.43513 | 0.23581 | 0.03251 |
| 560 | 0.50907 | 0.54317 | 0.4088 | 0.23264 | 0.03243 |
| 550 | 0.41281 | 0.49779 | 0.38601 | 0.23017 | 0.03241 |
| 540 | 0.34914 | 0.46581 | 0.3687 | 0.22852 | 0.03259 |
| 530 | 0.30618 | 0.44487 | 0.35679 | 0.22788 | 0.03278 |
| 520 | 0.27784 | 0.43271 | 0.34972 | 0.22805 | 0.03297 |
| 510 | 0.2609 | 0.42686 | 0.3461 | 0.229 | 0.03329 |
| 500 | 0.25257 | 0.42575 | 0.34496 | 0.23071 | 0.03358 |

| Tiempo (min) | Absorbancia | Concentración | Ln Conc. |
|--------------|-------------|---------------|-------------|
| 0 | 3.23793 | 25 | 3.218875825 |
| 30 | 1.8532 | 14.10783676 | 2.646730442 |
| 60 | 0.93111 | 6.966895173 | 1.94116967 |
| 90 | 0.50069 | 3.633593567 | 1.290222122 |
| 120 | 0.22095 | 1.467203085 | 0.383357925 |
| 150 | 0.02913 | 0 | 0 |

e) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “C”.

| MUESTRAS C | | | | | | | | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Long. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 700 | 0.41389 | 0.34723 | 0.41789 | 0.30297 | 0.23755 | 0.14522 | 0.17181 | 0.20814 | 0.10993 |
| 690 | 0.46058 | 0.38022 | 0.44327 | 0.32001 | 0.24832 | 0.15091 | 0.17487 | 0.20992 | 0.11084 |
| 680 | 0.57078 | 0.45643 | 0.49886 | 0.35639 | 0.26917 | 0.16101 | 0.17874 | 0.21212 | 0.112 |
| 670 | 0.84337 | 0.64258 | 0.62976 | 0.43997 | 0.31454 | 0.18166 | 0.18499 | 0.21521 | 0.11333 |
| 660 | 1.48479 | 1.08113 | 0.9324 | 0.63011 | 0.41525 | 0.22559 | 0.19612 | 0.21995 | 0.11517 |
| 650 | 2.75079 | 1.97579 | 1.55254 | 1.01948 | 0.62213 | 0.31634 | 0.21825 | 0.22832 | 0.11791 |
| 640 | 3.92471 | 3.18964 | 2.46043 | 1.61457 | 0.95947 | 0.47799 | 0.26041 | 0.24396 | 0.12249 |
| 630 | 4.04653 | 3.69234 | 3.1323 | 2.13884 | 1.32275 | 0.6922 | 0.32754 | 0.26847 | 0.12923 |
| 620 | 4.04141 | 3.67971 | 3.15954 | 2.29347 | 1.53055 | 0.87139 | 0.40153 | 0.29733 | 0.13747 |
| 610 | 3.6595 | 3.12119 | 2.72065 | 2.07346 | 1.4822 | 0.91016 | 0.44309 | 0.31839 | 0.14482 |
| 600 | 2.97099 | 2.48747 | 2.21408 | 1.7244 | 1.28147 | 0.82445 | 0.43749 | 0.32308 | 0.14872 |
| 590 | 2.46009 | 2.0364 | 1.83478 | 1.42706 | 1.07086 | 0.69914 | 0.40383 | 0.31481 | 0.14883 |
| 580 | 2.07054 | 1.71211 | 1.56604 | 1.21195 | 0.91085 | 0.59473 | 0.368 | 0.30232 | 0.14665 |
| 570 | 1.66534 | 1.39965 | 1.32432 | 1.03196 | 0.7859 | 0.5161 | 0.33972 | 0.29114 | 0.14403 |
| 560 | 1.29583 | 1.11186 | 1.10232 | 0.8678 | 0.67389 | 0.44777 | 0.31615 | 0.28147 | 0.14159 |
| 550 | 1.03639 | 0.89895 | 0.93052 | 0.73473 | 0.57872 | 0.38782 | 0.29571 | 0.27341 | 0.13982 |
| 540 | 0.87296 | 0.7593 | 0.81367 | 0.64079 | 0.50809 | 0.34104 | 0.27902 | 0.267 | 0.13834 |
| 530 | 0.7637 | 0.66547 | 0.735 | 0.5765 | 0.45862 | 0.30743 | 0.26698 | 0.26209 | 0.13735 |
| 520 | 0.69157 | 0.60373 | 0.68373 | 0.5345 | 0.42572 | 0.28461 | 0.25891 | 0.25884 | 0.1369 |
| 510 | 0.64821 | 0.56661 | 0.65296 | 0.50903 | 0.40506 | 0.27003 | 0.25396 | 0.25721 | 0.13694 |
| 500 | 0.62568 | 0.54757 | 0.63756 | 0.49579 | 0.39362 | 0.26154 | 0.25148 | 0.25637 | 0.13732 |

| Tiempo (min) | Absorbancia | Concentración | Ln Conc. |
|--------------|-------------|---------------|-------------|
| 0 | 6.47586 | 50 | 3.91202301 |
| 30 | 4.0948 | 31.46745964 | 3.44895398 |
| 60 | 3.74427 | 28.75285016 | 3.3587369 |
| 90 | 3.15806 | 24.21306406 | 3.18689232 |
| 120 | 2.17307 | 16.585006 | 2.80849903 |
| 150 | 1.35327 | 10.23622886 | 2.32593328 |
| 180 | 0.71374 | 5.283516682 | 1.66459191 |
| 210 | 0.33526 | 2.352454018 | 0.85545905 |
| 240 | 0.27128 | 1.856973704 | 0.61894812 |
| 270 | 0.12993 | 0.762316899 | -0.27139293 |

- f) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “D”.

| MUESTRAS D | | | | | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Long. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 700 | 1.10529 | 0.45394 | 0.31828 | 0.74333 | 0.63205 | 0.4233 |
| 690 | 1.16164 | 0.48375 | 0.33474 | 0.75866 | 0.64071 | 0.42881 |
| 680 | 1.27632 | 0.5474 | 0.36735 | 0.77884 | 0.65002 | 0.4344 |
| 670 | 1.5367 | 0.69652 | 0.44041 | 0.8106 | 0.66186 | 0.44023 |
| 660 | 2.13273 | 1.04365 | 0.60788 | 0.86922 | 0.6781 | 0.44662 |
| 650 | 3.31994 | 1.75787 | 0.95838 | 0.98267 | 0.70412 | 0.45386 |
| 640 | 6 | 2.80234 | 1.51178 | 1.18207 | 0.74977 | 0.4632 |
| 630 | 6 | 3.5678 | 2.03932 | 1.44859 | 0.82016 | 0.47493 |
| 620 | 6.05484 | 3.56748 | 2.24943 | 1.67829 | 0.90197 | 0.48918 |
| 610 | 5.09346 | 3.02103 | 2.0826 | 1.74022 | 0.95974 | 0.5036 |
| 600 | 3.81865 | 2.45071 | 1.75752 | 1.65115 | 0.97132 | 0.51444 |
| 590 | 3.27166 | 2.04052 | 1.46224 | 1.51342 | 0.94983 | 0.52046 |
| 580 | 2.90333 | 1.75233 | 1.24801 | 1.40071 | 0.92143 | 0.5236 |
| 570 | 2.53765 | 1.49022 | 1.07478 | 1.32018 | 0.89979 | 0.52561 |
| 560 | 2.21264 | 1.25 | 0.91735 | 1.25284 | 0.88303 | 0.52794 |
| 550 | 1.98913 | 1.0682 | 0.78809 | 1.19571 | 0.87097 | 0.53148 |
| 540 | 1.85152 | 0.94814 | 0.696 | 1.15375 | 0.86248 | 0.53505 |
| 530 | 1.76586 | 0.86957 | 0.6336 | 1.12778 | 0.85865 | 0.53896 |
| 520 | 1.72087 | 0.82123 | 0.59367 | 1.11513 | 0.85925 | 0.54368 |
| 510 | 1.703 | 0.79505 | 0.5703 | 1.11261 | 0.86382 | 0.54915 |
| 500 | 1.70731 | 0.78542 | 0.55887 | 1.1172 | 0.87063 | 0.55499 |

| Tiempo (min) | Absorbancia | Concentración | Ln Conc. |
|--------------|-------------|---------------|------------|
| 0 | 6.47586 | 50 | 3.91202301 |
| 30 | 6 | 46.2219 | 3.83345371 |
| 60 | 3.61162 | 27.72556877 | 3.32235505 |
| 90 | 2.07745 | 15.84449604 | 2.76282219 |
| 120 | 1.47583 | 11.18537027 | 2.4146067 |
| 150 | 0.82821 | 6.170006703 | 1.81969992 |
| 180 | 0.47624 | 3.444245432 | 1.23670485 |

g) Espectro obtenido en el UV-VIS y concentración obtenida por la lectura de la absorbancia en curva de calibración para cada una de las muestras de la prueba “E”.

| MUESTRAS E | | | | | | | | | |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Long. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 700 | 1.74429 | 0.77376 | 0.09982 | 1.31419 | 1.17433 | 0.3646 | 0.35261 | 0.41063 | 0.91486 |
| 690 | 1.8396 | 0.83921 | 0.1386 | 1.36016 | 1.21209 | 0.38363 | 0.36712 | 0.42009 | 0.92951 |
| 680 | 2.03887 | 0.98217 | 0.23072 | 1.44255 | 1.27471 | 0.41666 | 0.3895 | 0.43034 | 0.94459 |
| 670 | 2.4911 | 1.31775 | 0.46358 | 1.62216 | 1.39395 | 0.48131 | 0.42891 | 0.44202 | 0.96052 |
| 660 | 3.51378 | 2.08577 | 1.0106 | 2.0162 | 1.64368 | 0.61767 | 0.50504 | 0.45717 | 0.97665 |
| 650 | 5.22623 | 3.50429 | 2.12 | 2.78649 | 2.13662 | 0.89106 | 0.65118 | 0.47887 | 0.99401 |
| 640 | 5.74534 | 4.32282 | 3.49719 | 3.82085 | 2.89322 | 1.33344 | 0.89206 | 0.50968 | 1.01292 |
| 630 | 5.55352 | 4.45704 | 3.82673 | 4.31662 | 3.5668 | 1.82174 | 1.19108 | 0.54771 | 1.03292 |
| 620 | 5.70906 | 4.40321 | 3.84601 | 4.3465 | 3.84816 | 2.13328 | 1.43501 | 0.58594 | 1.05284 |
| 610 | 4.78633 | 4.1532 | 3.55592 | 4.1513 | 3.6396 | 2.11889 | 1.50179 | 0.6138 | 1.0724 |
| 600 | 5.59291 | 4.11777 | 3.01929 | 3.8676 | 3.31103 | 1.88675 | 1.40496 | 0.62555 | 1.09098 |
| 590 | 5.15909 | 3.58367 | 2.43166 | 3.44707 | 2.94988 | 1.61217 | 1.24432 | 0.62451 | 1.10871 |
| 580 | 4.51496 | 3.11404 | 1.97633 | 3.10216 | 2.67608 | 1.39285 | 1.10135 | 0.61879 | 1.12585 |
| 570 | 3.84284 | 2.61083 | 1.54996 | 2.7869 | 2.44196 | 1.22157 | 0.99018 | 0.61357 | 1.14222 |
| 560 | 3.4859 | 2.16163 | 1.15716 | 2.52137 | 2.24744 | 1.07058 | 0.89565 | 0.60981 | 1.15952 |
| 550 | 3.09531 | 1.83002 | 0.85322 | 2.29595 | 2.08514 | 0.94268 | 0.81432 | 0.60881 | 1.17782 |
| 540 | 2.87388 | 1.6196 | 0.64949 | 2.15326 | 1.97382 | 0.84715 | 0.75213 | 0.61003 | 1.19626 |
| 530 | 2.72569 | 1.48293 | 0.50851 | 2.05593 | 1.90343 | 0.78127 | 0.70883 | 0.61352 | 1.21547 |
| 520 | 2.65243 | 1.39931 | 0.41288 | 2.00493 | 1.8678 | 0.73923 | 0.6818 | 0.61926 | 1.23535 |
| 510 | 2.6137 | 1.3556 | 0.35151 | 1.98001 | 1.8549 | 0.71507 | 0.66715 | 0.62715 | 1.25546 |
| 500 | 2.61386 | 1.34149 | 0.31516 | 1.97689 | 1.86027 | 0.70498 | 0.66272 | 0.6371 | 1.27696 |

OXIDACIÓN DE COMPUESTOS QUE GENERAN
COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES

| Tiempo (min) | Absorbancia | Concentración | Ln Conc. |
|--------------|-------------|---------------|------------|
| 0 | 9.71379 | 75 | 4.31748811 |
| 30 | 5.16045 | 39.72017294 | 3.68185919 |
| 60 | 4.39119 | 33.76279272 | 3.51935939 |
| 90 | 3.81142 | 29.27287991 | 3.37666149 |
| 120 | 4.26065 | 32.7518518 | 3.4889595 |
| 150 | 3.63618 | 27.91576877 | 3.32919172 |
| 180 | 1.86447 | 14.19511502 | 2.65289789 |
| 210 | 1.22051 | 9.208095593 | 2.22008305 |
| 240 | 0.55167 | 4.028397981 | 1.39336877 |
| 270 | 1.03483 | 7.770133969 | 2.05028741 |