

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA



PROPUESTA DE UN TRATAMIENTO FOTOCATALITICO DE AGUAS
RESIDUALES DE PRODUCCION DE UN LABORATORIO
FARMACEUTICO

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

MICHELLE VIRGINIA LEMUS SALAZAR

JAIME ERNESTO ZALDAÑA GOMEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE
LICENCIATURA EN QUIMICA Y FARMACIA

SEPTIEMBRE 2009

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SANCHEZ

SECRETARIO GENERAL

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHAVEZ

FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA

DECANO

LIC. SALVADOR CASTILLO AREVALO

SECRETARIA

MSc. MORENA LIZETTE MARTINEZ DE DIAZ

COMITE DE TRABAJO DE GRADUACION

COORDINADORA GENERAL

Licda. María Concepción Odette Rauda Acevedo

**ASESORA DE AREA DE APROVECHAMIENTO DE RECURSOS
NATURALES**

MSc. Sonia Maricela Lemus Martínez

**ASESORA DE AREA DE GESTION AMBIENTAL: TOXICOLOGIA Y
QUIMICA LEGAL**

Licda. María Luisa Ortiz de López

DOCENTE DIRECTOR

MSc. Erick Edgardo Méndez

AGRADECIMIENTOS

A Dios principalmente por darnos la sabiduría y guiarnos durante todo el camino a la culminación de nuestra carrera.

A nuestro docente director: MSc. Erick Méndez por confiar en nosotros este proyecto, dedicarnos su tiempo, paciencia, y apoyo en todo momento y permitirnos de sus conocimientos científicos.

Al Lic. Pérez y al Lic. Juan Nelson por abrir las puertas del laboratorio farmacéutico donde obtuvimos las muestras de aguas residuales de la investigación.

A la coordinadora de trabajos de graduación Licda. María Concepción Odette Rauda Acevedo, a nuestros asesores de área MSc. Sonia Maricela Lemus y Licda. María Luisa Ortíz de López por la ayuda brindada para el desarrollo de nuestro trabajo de graduación.

A los docentes de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, por brindarnos sus conocimientos y por darnos las bases académicas para desempeñarnos profesionalmente.

Y a todas las personas que de una u otra forma han colaborado para que este trabajo se llevara a cabo. **MIL GRACIAS**

MICHELLE VIRGINIA LEMUS SALAZAR

JAIME ERNESTO ZALDAÑA GÓMEZ

DEDICATORIA

En especial a ti mi **Señor Jesús** por ser mi principal motor y apoyo en esos momentos de dificultades, tú me levantaste, me diste las fuerzas necesarias para continuar, me regalaste sabiduría, te entregue mi trabajo y por ti lo culmine.

A mi padre: René Francisco Lemus Cierra por ser mi ejemplo a seguir de fortaleza y mi principal sostén en la vida a quien admiro, respeto y amo mucho

A mi madre: Valentina Salazar de Lemus, por su amor, comprensión, paciencia y apoyo incondicional; y en especial en este camino hacia la realización de este sueño con sus consejos y oraciones.

A mi hermano: Rubén Alejandro Lemus Salazar por su cariño, su alegría, sus consejos y su apoyo para seguir adelante con mis estudios.

A mi abuelita: Virginia Salazar por sus bendiciones y oraciones para alcanzar este añorado sueño y su afecto incondicional.

A mi novio: Guillermo Oswaldo Menéndez por su apoyo y afecto e impulso a seguir luchando sin desmayar.

A mis amigos: que me han acompañado durante este proceso, por su apoyo, por estar siempre cuando los necesitaba, que Dios los bendiga siempre.

A mi compañero de trabajo de graduación, Jaime, por ser el compañero idónea, es decir mi compañero de formula por su apoyo, comprensión y dedicación para la realización de este trabajo.

MICHELLE VIRGINIA LEMUS SALAZAR

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO que me lleno de fortaleza para seguir adelante no importando los muchos obstáculos que se cruzan en el camino, pero que al final de cuenta nos ayudan a crecer, recordando a su hijo Jesucristo que es lo más especial.

A MIS PADRES: Ana Armida Gómez Hernández y Roberto Pacheco Avelar, que son mi prioridad, que han sido mi mayor apoyo, y se han sacrificado de manera que pudiese llegar hasta donde estoy.

A mis abuelos, Don Ricardo Gómez Alfaro y Berta Hernández de Gómez Q.E.P.D, por su ayuda incondicional y por apoyarme en mi formación como persona y como un buen profesional, como a enseñar lo valioso que es la honestidad y la amistad, lo quiero mucho.

A mis tías, Elsa Mirella Gómez de Elizondo, Nilda Lorena Gómez de Galdamez, Ana Evelia Cornejo y Karen Osmara Gómez por ser tan especiales, por ser un gran apoyo para mí y María Eugenia de León Q.E.P.D por haber sido tan especial en mi vida, la recordare por siempre,

A mis primos, Sandra Roxana Gómez Guerra, Eunice Lorena Elizondo Gómez, Guillermo Danilo Gómez, Lorena Abigail Galdamez Gómez y Carlos Fernando Galdamez Gómez, por ser tan especiales, por ser un gran apoyo para mí, les agradezco y quiero mucho, y a Eduardo Antonio Estévez Cornejo Q.E.P.D, que lo recordare siempre y nunca lo olvidare.

A mi compañera de trabajo de graduación Michelle, por su apoyo incondicional, su paciencia y por su amistad en todo momento.

JAIME ERNESTO ZALDAÑA GÓMEZ.

INDICE

Contenido	Página
Resumen	
Capitulo I	
1.0 Introducción	xxvi
Capitulo II	
2.0 Objetivos	
2.1 Objetivo General	
2.2 Objetivos Específicos	
Capitulo III	
3.0 Marco teórico	31
3.1 Contaminación ambiental	32
3.2 Aguas residuales industriales	33
3.3 Tratamientos de aguas residuales	34
3.3.1 Tratamientos primarios	34
3.3.2 Tratamientos secundarios	35
3.3.3 Tratamientos terciarios	37
3.4 Procesos avanzados de oxidación	39
3.5 Generalidades de Fotocatálisis	45

3.5.1 Historia	45
3.5.2 Definición	47
3.6 Características del fotocatalizador	48
3.7 Introducción al método	50
3.8 Principio del método	51
3.9 Cinética del proceso de fotocátalisis	58
3.10 Parámetros que influyen en el proceso	62
3.11 Aplicaciones potenciales	63
3.12 Seguimiento del proceso Fotocatalítico	65
Capitulo IV	
4.0 Diseño Metodológico	68
4.1 Tipo de Estudio	69
4.2 Metodología	69
4.2.1 Investigación Bibliográfica	69
4.2.2 Investigación de Campo	70
4.2.3 Investigación de Laboratorio	71
4.3. Parte Experimental	72
4.3.1. Sondeo cualitativo del tipo de agua de la muestra	72
4.3.2. Estudio Cinético	73

4.3.3. Procedimiento del tratamiento fotocatalítico	73
4.3.4. Análisis Posteriores	75
Capitulo V	
5.0 Resultados e Interpretación	77
Capitulo VI	
6.0 Conclusiones	181
Capitulo VII	
7.0 Recomendaciones	186
Bibliografía	
Glosario	
Anexos	

INDICE DE CUADROS

CUADRO N°	Página
1. Resultados del tratamiento fotocatalítico de las muestras de aguas residuales en estudio y fenol 12 ppm.	94
2. Constantes de velocidad de las muestras a pHs Diferentes	95
3. Análisis de parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	105
4. Análisis porcentual de los parámetros críticos para el agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	114
5. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	115
6. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	117
7. Análisis de parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de suero oral Oral dex, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	118
8. Análisis porcentual de los parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de suero oral Oral dex, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	126
9. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de suero oral Oral dex, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	127

10. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	128
11. Análisis de parámetros críticos de agua residual de producción de crema fría Artrispot antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	129
12. Análisis porcentual de los parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de crema fría artrispot, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	138
13. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrispot, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	139
14. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción de crema fría artrispot, antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.	140
15. Análisis de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	142
16. Análisis porcentual de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	151
17. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	152
18. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento	153

	fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	
19:	Análisis de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	155
20.	Análisis porcentual de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	163
21.	Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	165
22.	Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	167
23:	Análisis de parámetros críticos del agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	168
24.	Análisis porcentual de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	176
25.	Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la crema fría Artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.	177
26.	Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción	179

de crema fría artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico Según NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable.

INDICE DE FIGURAS

Figura No.	Página
1. Esquema de los eventos ocurridos en una partícula de TiO_2 en contacto con el medio, conteniendo un oxidante y un reductor.	47
2. Estructura cristalina de TiO_2 . (a) anatasa y (b) rutilo	49
3. Niveles electrónicos resultantes del enlace entre átomos idénticos.	52
4. Distribución de las bandas o niveles energéticos de un semiconductor.	53
5. Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor-electrolito bajo iluminación.	55
6. Degradación de aguas residuales de procesos de una industria farmacéutica, utilizando luz solar y 200 mg/L de TiO_2 en suspensión.	64
7. Ejemplo de aniquilación de bacterias en agua mediante fotocatalisis, utilizando TiO_2 , luz y tecnología solar.	65
8. Muestreo de aguas residuales de producción del laboratorio farmacéutico.	70
9. Puntos de muestreo tomados para la recolección de las aguas residuales provenientes de las líneas de producción en estudio.	71
10. Esquema de trabajo de degradación fotocatalítica de aguas residuales.	72
11. Procedimiento del tratamiento fotocatalítico	75
12. Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol 10 ppm a pH 6.5 utilizando ZnO y radiación UV-VIS.	79
13. Espectros UV-VIS de fenol, ambroxol y cloruro de sodio.	81

14. Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH 6 utilizando ZnO y radiación UV-VIS.	82
15. Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrispport, a pH 6 utilizando ZnO como fotocatalizador y radiación UV-VIS.	84
16. Cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 251 nm de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol 12 ppm. a pH 6.5	86
17. Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 251 nm de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol 12 ppm a pH de 6.5	88
18. Cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 234 nm de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH 6	89
19. Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda a 234 nm de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH 6.0	90
20. Cinética de degradación fotocatalítica de la banda a 218 nm de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrispport a pH 6	91
21. Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 218 nm del agua residual proveniente de la producción de crema fría artrispport a pH 6	92
22. Degradación fotocatalítica de la banda de 270 nm de fenol 12 ppm a pH 6.0 en presencia de ZnO y radiación UV.	96
23. Cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 270 nm de fenol 12 ppm. pH 6	98

24. Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 270 nm de fenol 12 ppm a pH 6	99
25. Efecto del Ph sobre la velocidad de reacción del fenol 12 ppm a diferentes pHs: 6.0, 7.0 y 10.	100
26. Comparación de las muestras de agua residual de producción de jarabe de ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico	106
27. Comparación de las muestras de agua residual de producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico	119
28. Comparación de las muestras de agua residual de producción de crema fría Artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico	131
29. Disminución del tamaño de partículas de ZnO en el ultrasonido	199
30. Irradiación de luz ultravioleta utilizando una lámpara de Arco de Xenón de alta presión de 150 Watts	200
31. Toma de alícuotas de los diferentes intervalos de tiempo establecidos.	201
32. Toma de espectros UV-VIS en espectrofotómetro Cary 50 de las alícuotas centrifugadas.	203
33. Análisis físico químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de jarabe de ambroxol antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.	205
34. Análisis físico-químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de suero oral Oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.	206
35. Análisis físico-químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de crema fría Artrisport antes y	

después del tratamiento fotocatalítico según NSO
13:07.01:04 para la calidad de agua potable.

INDICE DE TABLAS

TABLA N°		Página
1.	Comparación del rendimiento de uso de los floculantes en el tratamiento de aguas residuales.	35
2.	Principales Procesos de Oxidación Avanzada	40
3.	Reacciones involucradas en el proceso de degradación fotocatalítica.	57
4.	Cinética de degradación fotocatalítica de fenol 12 ppm a pH=6.0	209
5.	Degradación fotocatalítica de fenol 12 ppm.a pH = 6.0	211

INDICE DE ANEXOS

ANEXO N°

1. Disminución del tamaño de partículas de ZnO en el ultrasonido
2. Irradiación de luz ultravioleta utilizando una lámpara de arco de Xenón de alta presión de 150 Watts
3. Toma de alícuotas de los diferentes intervalos de tiempo establecidos.
4. Toma de espectros UV-VIS en espectrofotómetro Cary 50 de las alícuotas centrifugadas.
5. Análisis físico químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de jarabe de ambroxol antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.

Análisis físico-químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de suero oral Oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.

Análisis físico-químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de crema fría Artisport antes y después del

tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.

6. Cinética de degradación fotocatalítica de fenol 12 ppm, a pH 6.0

7. Degradación fotocatalítica de fenol 12 ppm. pH 6

8. Ejemplos de aplicación

ABREVIATURAS (7, 13)

A	Absorbancia
b	Espesor de la celda de cuarzo
C	Concentración de la muestra (Molar)
°C	Grado Celsius ó Centígrado
cm	Centímetro
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días a 20°C
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ε	Epsilon de fenol a longitud de onda de 270 nm = 1450 M ⁻¹ cm ⁻¹
EMPP	Error máximo propagado posible
M	Molar
mL	mililitro
mL/L	mililitros por litro
mg/L	miligramos por litro
Nm	nanómetros
NMP	número mas probable
NTU	unidades nefelométricas de referencia
ST	sólidos totales
STD	sólidos totales disueltos
UFC	Unidades formadoras de colonias
UV	Ultravioleta
UV-VIS	Ultravioleta-Visible
ZnO	Oxido de zinc

RESUMEN

RESUMEN

La presente investigación propone un novedoso tratamiento fotocatalítico a las aguas residuales de un laboratorio farmacéutico provenientes de la producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex, crema fría artrisport, lo cual se procedió a tomar dos muestras de aguas residuales empleando una muestra como control y la otra para aplicar el método fotocatalítico, utilizando el fotocatalizador óxido de zinc e irradiando con luz ultravioleta la suspensión, generando así los radicales hidroxilo responsables de la fotooxidación de los contaminantes orgánicos disueltos en las aguas residuales. Por medio de espectroscopia UV-VIS se encontró presente en las muestras tomadas el compuesto fenol, este es un contaminante del agua de difícil destrucción y el que más tiempo tardó en fotodegradarse, se tomó como modelo matemático cinético para estimar el tiempo de residencia de acuerdo con la ley cinética encontrada para el agua residual en estudio. El tiempo necesario para lograr la completa fotodegradación del compuesto fenol hasta el valor máximo permisible por la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales fue 7 horas 20 minutos logrando disminuir la concentración de 400 ppm a 0.45 ppm, con el tratamiento fotocatalítico. Así mismo al irradiar el tiempo de residencia las muestras de agua residual de producción de suero oral oraldex, jarabe de ambroxol y crema fría artrisport se han degradado fotocatalíticamente todos los contaminantes presentes. Se realizaron análisis de los parámetros críticos antes y después del tratamiento fotocatalítico

a las muestras de aguas residuales provenientes de la producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport. Los resultados cumplen con los parámetros fisicoquímicos: DBO₅, DQO, Sólidos sedimentables, aceites y grasas; y con los siguientes parámetros microbiológicos: Coliformes totales, Coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* y el análisis complementario de fenol establecidos en la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales. Obteniendo el beneficio de descargar aguas residuales libres de contaminantes al cuerpo receptor contribuyendo en la conservación del medio ambiente. Así mismo se determinó la calidad antes y después del tratamiento fotocatalítico a las muestras de aguas residuales proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport. Los resultados cumplen con los parámetros críticos según la NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable como son: pH, color, turbidez, hierro total, manganeso total, dureza, sulfatos, zinc total y los parámetros microbiológicos: coliformes totales, coliformes termotolerantes y *Escherichia coli*. El análisis complementario de fenol, no se encontró en la Norma Salvadoreña Obligatoria 13:07.01:04 para la calidad de agua potable, sin embargo cumple según el límite máximo permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Se demuestra que esta técnica podría convertirse en un futuro en un método de potabilización de agua, por lo que se sugiere realizar otras investigaciones más profundas.

CAPITULO I
INTRODUCCION

1.0 INTRODUCCION

Las industrias farmacéuticas utilizan el recurso hídrico para diferentes procesos en su producción, generando como resultado aguas residuales que aumentan la contaminación del agua. Esta contaminación es debido a las diferentes sustancias tóxicas disueltas y suspendidas en el agua residual que al ser vertidos al cuerpo receptor: ríos, lagos, mares y suelos aumentan el grado de contaminación, en este último el agua residual se filtra y las sustancias tóxicas disueltas pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas que a la vez son de importancia para la existencia de la vida

En el país existen en la actualidad varios sistemas de tratamiento para las aguas residuales, estos remueven y disminuyen los contaminantes químicos por medio de procesos de sedimentación, oxidación y filtración; sin embargo, estos métodos no eliminan los contaminantes sino que solo los disminuye de concentración. Por lo tanto, es necesario implementar nuevas técnicas para el tratamiento de las aguas residuales de la industria farmacéutica.

Existen investigaciones científicas sobre diferentes métodos de tratamientos para las aguas residuales, basándose en métodos para la disminución de la concentración de contaminantes y la implementación de sustancias químicas que potencializan la acción por medio de diferentes reacciones, produciendo la inactivación y en algunos casos la eliminación de los contaminantes tóxicos disueltos en el agua residual. La utilización de sustancias químicas en el tratamiento para las aguas residuales puede generar otros problemas de contaminación para el medio ambiente, debido a que los productos

secundarios generados por las reacciones pueden ser más tóxicos que los contaminantes disueltos en el agua residual.

Al igual existen varias investigaciones sobre los procesos fotocatalíticos que se ven afirmadas en una gran cantidad de artículos científicos publicados en los últimos años, que especifican que los procesos de fotocátalisis heterogénea, procesos de foto-fenton y fotocátalisis homogénea son tecnologías solares que se encuentran en estudio.

Los procesos fotocatalíticos fueron considerados a finales de los ochenta ('80) como una técnica para el tratamiento de cualquier contaminante orgánico e inorgánico disuelto y suspendido en el agua. Llevando esta técnica a una mayor profundidad de análisis ya que se concreta como una nueva tecnología no solo para la disminución de contaminantes, sino para la destrucción de estos.

Los procesos fotocatalíticos utilizados para la degradación de contaminantes disueltos en el agua es un método altamente novedoso, de bajo costo y que posee un campo amplio de importante aplicación, ya que este proceso presenta una gran sinergia entre la luz solar y la conservación del medio ambiente. Este método no es específico y puede emplearse para cualquier mezcla de contaminantes.

La presente investigación propuso un tratamiento fotocatalítico a las aguas residuales obtenidas de las áreas de producción del Laboratorio farmacéutico sometido al estudio. Realizando análisis de la calidad del agua residual antes y después del tratamiento propuesto. Entre los parámetros analizados se encuentran: La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la

Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Sedimentables, Aceites y Grasas, establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria para Aguas Residuales NSO 13.49.01:06. Y como análisis fisicoquímicos establecidos como parámetros críticos realizados según la Norma Salvadoreña Obligatoria para la Calidad de Agua Potable NSO 13:07.01:04. Como son: pH, Color, Olor, Turbidez, Zinc total, Manganeso total, Hierro total, Sulfatos, Dureza, y análisis microbiológicos la determinación de Coliformes Totales, Coliformes Termotolerantes, Escherichia coli.

CAPITULO II

OBJETIVOS

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Proponer un tratamiento fotocatalítico a las aguas residuales de producción de una industria farmacéutica.

2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1. Demostrar experimentalmente la funcionalidad del método fotocatalítico en el tratamiento para las aguas residuales de producción de un laboratorio farmacéutico.
- 2.2.2. Hacer un estudio cinético para determinar el tiempo de irradiación en el tratamiento fotocatalítico de las diferentes muestras de aguas residuales tomadas en un laboratorio farmacéutico.
- 2.2.3. Establecer que la calidad de las aguas tratadas fotocatalíticamente cumple con los requisitos de calidad fisicoquímicos: DBO₅, DQO, Sólidos Sedimentables, Aceites y Grasas; y con los siguientes parámetros microbiológicos: Coliformes Totales, Coliformes Termotolerantes y *Escherichia coli*. Establecidos en la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales.
- 2.2.4. Relacionar que la calidad de las aguas tratadas fotocatalíticamente cumple con los parámetros críticos según la NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable como son: pH, color, turbidez, hierro total, manganeso total, dureza, sulfatos, zinc total. y los parámetros microbiológicos: coliformes totales, coliformes termotolerantes y *Escherichia coli*.

CAPITULO III
MARCO TEÓRICO

3.0. MARCO TEÓRICO

3.1. Contaminación ambiental. ⁽¹⁷⁾

Es la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) o bien de una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, existen en la actualidad diferentes tipos de contaminación ambiental, como son:

- La contaminación del suelo.
- La contaminación del aire.
- La contaminación del agua.

La contaminación del agua: para fines de la presente investigación será el único tópico que se desarrollará; y consiste en la adición de cualquier agente extraño o tóxico para la composición del agua; por lo tanto surge la necesidad de desarrollar métodos de tratamiento de aguas residuales para disminuir en alguna medida el impacto ambiental negativo que genera este tipo de vertidos a nuestra fuente de aguas; lo cual es indispensable para lograr un mayor nivel de desarrollo de la población.

Debido a este problema es importante llevar a cabo tratamientos para aguas residuales que contribuyan con la descontaminación y destoxificación ⁽⁶⁾ de los escenarios o cuerpo receptor.

3.2. Aguas Residuales de la Industria Farmacéutica.⁽¹⁷⁾

La fracción del agua empleada por las industrias farmacéuticas para la limpieza de área de producción y de la maquinaria utilizada para la fabricación de los diferentes medicamentos, la mayor parte del flujo se vierte

finalmente a las corrientes naturales de aguas en forma de agua de desecho.

En esta forma la industria contribuye a la contaminación del medio ambiente y debido al proceso de la industrialización aumenta las cargas que resultan para ser vertidas en los recursos disponibles de aguas, causando efectos negativos en el cuerpo receptor. Se ha prestado poca atención en el tratamiento de aguas residuales industriales, debido al incumplimiento de las regulaciones ambientales por parte de la industria.

Las propiedades de las agua residuales industriales son tan variadas como la industria misma, debido a que contienen materiales suspendidos, coloidales y disueltos; así como sólidos orgánicos e inorgánicos, además pueden ser excesivamente ácidas o alcalinas y pueden tener baja o alta concentración de colorantes y contaminantes de difícil remoción.

3.3. Tratamientos de aguas residuales.

Captación y Pretratamiento. ⁽¹⁷⁾

Estas aguas residuales de la industria farmacéutica se pueden descargar en los sistemas municipales de aguas residuales en puntos adecuados que no sobrecarguen o dañen las obras de captación y tratamiento, pero es más conveniente aplicar un previo tratamiento a estas aguas de desecho industrial para que el impacto ambiental no sea elevado. El objetivo del pretratamiento es remover grasas, aceites y otros materiales flotantes o sedimentables para que el agua pueda ser tratada adecuadamente y neutralizar sin ningún riesgo. La fialidad del tratamiento de aguas residuales

es la de remover partículas menor tamaño y contaminantes presentes en el agua, que no fueron eliminados en el pretratamiento.

Existen tres tipos de tratamiento de aguas residuales los cuales son:

1. Tratamiento Primario.
2. Tratamiento Secundario.
3. Tratamiento Terciario.

3.3.1. Tratamiento Primario ⁽¹⁷⁾

Después del pretratamiento de las aguas residuales se continúa con el tratamiento primario al cual se le conoce también como: “**Clarificación, Sedimentación o Decantación**”. Es un proceso unitario en el cual se deja decantar en un tanque de decantación el agua residual por un periodo de 2 horas, y producir así un efluente líquido clarificado en línea y un fango líquido-sólido (denominado fango primario), el objetivo es producir un efluente líquido de calidad aprovechable para seguir con los demás etapas del tratamiento y lograr así una separación de sólidos que da lugar a un fango primario que puede ser convenientemente tratado y vertido. Entre los beneficios de este tratamiento están:

- Reducción de los sólidos en suspensión, reducción de la Demanda, Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), reducción de la cantidad de fangos activados en exceso en la planta de fangos activos, separación del material flotante y homogenización parcial de los caudales y carga orgánica. En el tratamiento se lleva a cabo una sedimentación en reposo del material

flotante y grasas, esta sedimentación se lleva a cabo en sedimentadores que pueden ser: circulares (los más frecuentes), rectangulares y cuadrados.

- Decantación primaria mejorada químicamente.⁽²⁴⁾

La adición de coagulantes (sales de hierro, cal, aluminio) previa a la decantación provoca la floculación de la materia fina en suspensión de lo flóculos mas propensos a la decantación. (Ver tabla N° 1). Esto aumentará el rendimiento de la separación y la mayor reducción de la DBO₅ y los sólidos suspendidos.

Tabla N° 1 Comparación del rendimiento de uso de los floculantes en el tratamiento de aguas residuales.⁽²⁴⁾

Parámetros	Rendimiento de la eliminación en la decantación primaria	
	Con Coagulantes (%)	Sin Coagulantes (%)
STS	60-90	40-70
DBO ₅	40-70	25-40
DQO	30-60	20-30
BACTERIAS	80-90	50-60

3.3.2. Tratamientos Secundarios.

Una vez eliminados de un 40 a un 60% de los sólidos en suspensión y reducida de un 20 a un 40% la DBO₅ por medios físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce la cantidad de materia orgánica en el agua. El tratamiento secundario supone, de hecho, emplear y acelerar los procesos naturales de eliminación de los residuos.

Los mecanismos de separación de la materia orgánica incluyen:

- *Biodegradación:* Es el mecanismo dominante para la eliminación de compuestos orgánicos en las aguas residuales industriales.
- *Desorción con aire (lavado de aire):* Es para sistemas aerobios donde por medio de la acción del aire se va oxidando las partículas orgánicas.
- *Absorción:* Se da por la aplicación de compuestos que absorban todos los compuestos orgánicos que posee el agua residual.

Sistemas de Tratamiento Secundario:

- *Cultivos en suspensión:*

Los sistemas de cultivos en suspensión se definen como aquellos procesos aerobios que obtienen una alta concentración de microorganismos a través del recirculado de sólidos biológicos. Los organismos bacterianos transforman la carga orgánica biodegradable de las aguas residuales en ciertas fracciones inorgánicas en nueva biomasa y otros productos no contaminantes como el dióxido de carbono gaseoso.

- *Cultivos fijos:*

Son conocidos también como reactores de película fija permiten el crecimiento de una capa bacteriana en la superficie de un medio expuesto a la atmósfera de donde se absorbe el oxígeno necesario. Al hacerlo así la capa microbiana se extiende con la propia agua residual y en este proceso la capa microbiana transforma la carga orgánica biodegradable de las aguas residuales en biomasa y subproductos.

- *Cultivos duales, biológicos en suspensión y fijos:*

Este emplea dos etapas de los procesos anteriores tanto fijos como en suspensión con el objetivo de conseguir un efluente que sea de primera calidad.

- *La filtración en medio granular:*

Esta se aplica cuando la concentración de los sólidos sedimentables en efluente es menor a 10 mg./L. Este tratamiento se va aplicar cuando el efluente de agua es bajo; si el efluente de agua a tratar es alto se aplican a la vez coagulantes químicos.

- *Absorción con carbón activado:*

Los compuestos orgánicos que se encuentre disueltos o suspendidos en el agua residual se pueden eliminar con carbón activado en polvo o carbón activado granular.

El carbón activado elimina selectivamente estos compuesto cuando esta entra en contacto con el agua que contenga materia orgánica mediante los siguientes procesos: Absorción de moléculas menos polares, filtración de las partículas mayores, deposición parcial de las partículas coloidales en la en la superficie externa del carbono.

3.3.3. Tratamientos Terciarios

Se realiza con la finalidad de remover todos aquellos contaminantes que no se eliminaron en el tratamiento secundario y que se encuentre disueltos en el agua residual.

- Tratamiento químico:

Este tratamiento puede emplearse en muchos problemas de depuración de las aguas residuales. Entre estos tenemos:

- Cloro.

La desinfección con cloro sigue siendo la forma más común de desinfección de las aguas residuales debido a su bajo historial de costo y del largo plazo de la eficacia. Una desventaja es que la desinfección con cloro del material orgánico residual puede generar compuestos orgánicamente clorados que pueden ser carcinógenos o dañinos al ambiente. La clorina o las "cloraminas" residuales puede también ser capaces de tratar el material con cloro orgánico en el ambiente acuático natural. Además, porque la clorina residual es tóxica para especies acuáticas, el efluente tratado debe ser químicamente desclorinado, agregándole complejidad y costo del tratamiento.

- Ozono.

El ozono es oxígeno enriquecido, constando de tres átomos de oxígeno, es inestable y se descompone con cierta facilidad en oxígeno normal y oxígeno nascente, que es un fuerte oxidante. Debido a esta característica, actúa con gran eficiencia como desinfectante y se constituye como el más serio competidor del cloro. Se considera que el ozono es el desinfectante de mayor eficiencia microbicida y requiere tiempos de contacto bastante cortos. Se ha demostrado que cuando el ozono es transferido al agua mediante un mezclador en línea sin movimiento, las bacterias son destruidas en dos

segundos. Por ello, el tiempo de contacto en la ozonización no tiene mayor importancia.

- Radiación ultravioleta.

Mediante el uso de radiación ultravioleta a una longitud de onda adecuada, se eliminan los microorganismos y agentes patógenos del agua dando como resultado un elevado nivel de desinfección.

3.4. Procesos avanzados de oxidación. (2,5,15,16)

La creciente demanda para la descontaminación de aguas de diversos orígenes, materializadas en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado en la última década, al desarrollo de nuevas tecnologías de purificación.

En la práctica, la aplicación de los métodos de tratamientos debe tener en cuenta fundamentalmente la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar. Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio) .Sin embargo en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos se esta recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas *Tecnología ó Procesos Avanzados de Oxidación (TAO's o PAO's)*, muy poco aplicado y aun menos difundidos en los países de economías

emergentes como los de América Latina. La mayoría de las TAO's puede aplicarse a la remediación y destoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña y mediana escala. Los métodos pueden usarse solo o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelo. Permiten incluso la desinfección por la inactivación de bacterias y virus. (7) (Ver tabla N° 2)

Las TAO's se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. El concepto fue inicialmente establecido por *Glaze y colaboradores*, quienes definieron los PAO's, como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias y poderosas, principalmente el radical Hidroxilo (HO^\bullet). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica.

Tabla N° 2. Principales Procesos de Oxidación Avanzada.(14)

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
- Ozonización en medio alcalino (O_3 / OH^-)	- Oxidación en agua sub/y supercrítica
- Ozonización con peroxido de hidrógeno ($\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$)	- Procesos fotoquímicos
- Procesos Fenton ($\text{Fe}^{2+} / \text{H}_2\text{O}_2$) y relacionados	- Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UV-V)
- Oxidación electroquímica	- UV / peroxido de hidrogeno
- Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	- UV / O_3
- Plasma no térmico	- Foto-Fenton y relacionadas
- Descarga electrohidráulica – Ultrasonido	- Fotocatálisis heterogénea

Algunos TAO's como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas recurren además a reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos pocos susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados.

Existen otras tecnologías que pueden incluirse también entre las TAO's, como el tratamiento con barreras permeables reactivas de Fe metálico (Fe cero covalente) y la oxidación con K_2FeO_4 (VI). Sin embargo en este proceso de investigación enfocaremos las tecnologías que involucran la regeneración del radical HO^* , principalmente la **Fotocatalisis Heterogénea**. Entre las ventajas de estas nuevas tecnologías sobre los métodos convencionales podemos citar:

- No solo cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre del aire o en el tratamiento del carbón activado), sino que los transforma químicamente.
- Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidante, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- Usualmente no generan barros que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- Son muy útil para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento principalmente el biológico.

- No se forman sus productos de reacción, o se forman en baja concentración.
- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- En muchos casos, consumen mucho 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.

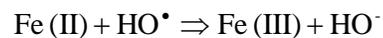
Las TAO's son especialmente utilizados como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar una purificación de las aguas a los cuerpos receptores.

Los procesos involucrados poseen una mayor facilidad termodinámica y una velocidad de oxidación muy incrementada por la participación de radicales, principalmente el radical hidroxilo (HO^{\bullet}), que es el oxidante más energético. Esta especie posee propiedades adecuadas para atacar virtualmente a todos los compuestos orgánicos y reaccionar 10^6 - 10^{12} veces más rápido que oxidantes alternativos como el O_3 .

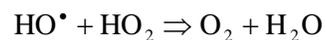
- Tratamiento con el reactivo de Fenton.⁽¹⁵⁾

Los conocidos ensayos del Fenton de fines del siglo XIX demostraron que las soluciones de peróxido de hidrogeno y sales ferrosas eran capaces de oxidar los ácidos tartáricos y málicos y otros compuestos orgánicos.

Estas reacciones forman radicales hidroxilos dichos radicales pueden reaccionar por dos vías la oxidación de Fe (II) y el ataque a la materia orgánica.



El proceso es realmente efectivo para destruir compuestos orgánicos y destruir contaminantes ya que es muy efectivo para la generación de iones hidroxilo pero un exceso de iones ferroso puede atraparlos al igual que a los halógenos.



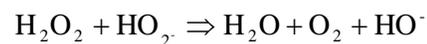
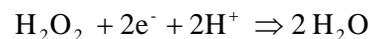
El proceso del Fenton ha resultado efectivo para la degradación de compuestos alifáticos y aromáticos clorados, nitroaromáticos, azo, clorobencenos, fenoles, fenoles clorados y formaldehído.

Es un buen oxidante de herbicida y otros contaminantes del suelo, también puede descontaminar solventes de limpieza a seco y puede decolorar aguas residuales. Ha mostrado éxitos al reducir el DQO en aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de lixiviación.

Las ventajas de este método es el fácil uso del método ya que el Fe (II) es abundante y no es tóxico y el peróxido de hidrogeno es fácilmente manejable y es ambientalmente benigno.

- Tratamiento con ozono y peroxido (O_3 / H_2O_2)

La ozonización transforma los contaminantes en compuestos más simples, refractarios al reactivo. Se logra una mejoría al agregar agua oxigenada. El peroxido (H_2O_2) es un ácido débil, un poderoso oxidante y compuesto inestable.

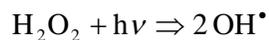


El uso de dos o mas oxidantes permite aprovechar el efecto sinérgico entre ellos, lo cual produce una destrucción adicional da la carga orgánica. Sin embargo es difícil establecer la cantidad de oxidantes para producir un efecto directo entre ellos o lograr una mezcla adecuada entre ellos.

El peroxido puede iniciar la descomposición del ozono por transferencia de electrones, esta reacción genera iones hidroxilo consumiendo el peroxido y el ozono.

- Tratamiento con el reactivo de Fenton con luz ultravioleta (UV)

Esta reacción produce una fotólisis si la molécula de peroxido por fotones con una energía superior a la de la unión de O-O, esta reacción produce dos iones hidroxilo por cada molécula de peroxido.



Esta unión de oxidantes ofrece una gran ventaja ya que el oxidante es bastante accesible, es térmicamente estable.

3.5. Generalidades de Fotocatálisis. (2,5,14,16,18)

Por diversas razones, el proceso de tratamiento y/o purificación de aguas mediante fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio como catalizador es en la actualidad, una de las aplicaciones fotoquímicas que mas interés ha despertado entre la comunidad científica internacional.

La fotocatalisis heterogénea a diferencia de la mayoría de los procesos fotoquímicos, no es selectiva y puede emplearse para tratar mezclas complejas de contaminantes. Además, provee la posibilidad de la utilización de la radiación solar como fuente primaria de energía, le otorga un importante y significativo valor medioambiental. El proceso, constituye un claro ejemplo de tecnología sostenible y puede incluirse en los procesos de química verde.

3.5.1. Historia.

La primera publicación sobre este proceso de degradación de contaminantes en fases tanto acuosa como gaseosa se debe a Carey y aparece en 1976. Desde entonces un análisis histórico de la evolución del desarrollo del proceso fotocatalítico para la purificación de aguas permite identificar cuatro etapas claramente diferentes.

- *PRIMERA ETAPA*: con escasas publicaciones, aproximadamente entre 1976 y 1985 solo unos pocos científicos trabajan en el tema; no se vislumbra todavía una aplicación concreta.

- *SEGUNDA ETAPA*: a mediados de la década de los 80s y hasta los primeros años de la década de los 90s coincide con una creciente preocupación e inquietud de la comunidad científica internacional sobre temas medio ambientales; en ella se plantea la posibilidad de aplicar este proceso al tratamiento de contaminantes en aguas. El éxito de las primeras experiencias da lugar a una masiva incorporación de grupos de investigación al estudio del tema. En esta situación, a finales de los 80`s, como resultado de extrapolaciones muy optimistas de los resultados obtenidos hasta entonces, llegó a considerarse el proceso fotocatalítico como un posible método universal para la degradación de contaminantes orgánicos.

- *TERCERA ETAPA*: a mediados y finales de la década de los 90s es una especie de antítesis de la etapa anterior. Se registra una profusión de resultados contradictorios y los estudios de investigación y de aplicaciones generaron un debate sobre las aplicaciones reales del proceso. Se enfatizaron los inconvenientes provenientes de las limitaciones para producir grandes cantidades de radicales hidroxilo y de la lentitud del proceso de degradación global. Se obtienen resultados alentadores al estudiar sistemas casi reales, simultáneamente con otros resultados negativos o dudosos, y se genera así mucha confusión en la percepción del público no científico.

- **CUARTA ETAPA:** en la que nos encontramos actualmente, se caracteriza por una visión mas conservadora y realista de las posibilidades de la tecnología asociada, enfocada en aquellas aplicaciones iniciales que aparecen mas prometedoras. Ya no se cree que el proceso de fotocatalisis, tal y como se conoce y se define en la actualidad, puede ser algo universal, pero en cambio se han identificado aplicaciones especificas y concretas en las que la tecnología, desarrollada adecuadamente puede resultar viable y competitiva.

3.5.2. Definición.

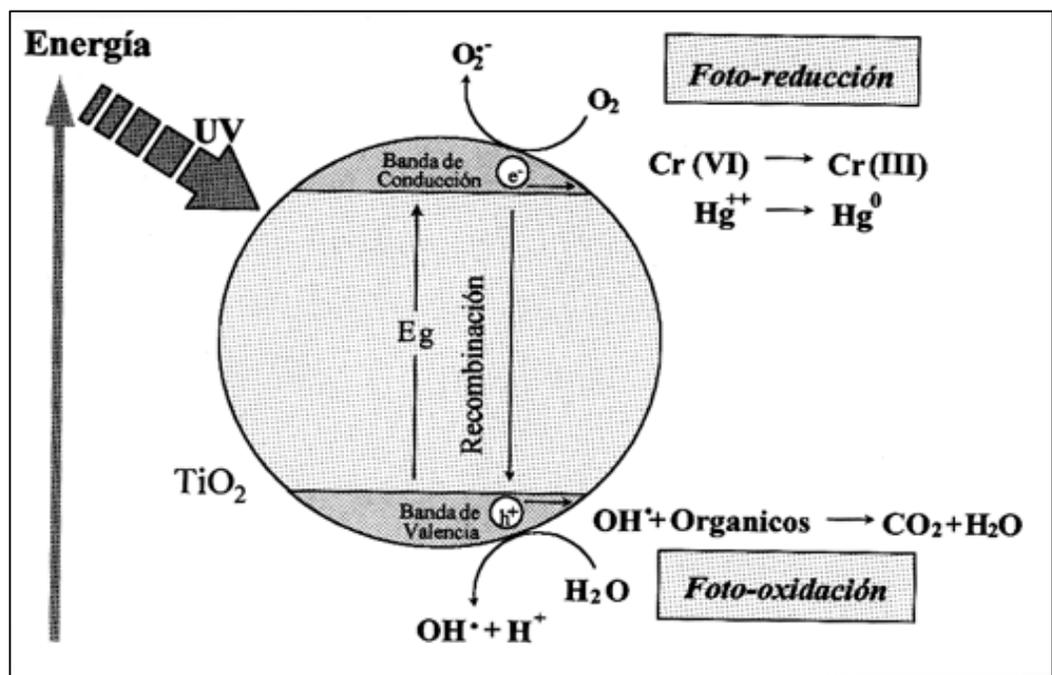


Figura N° 1: Esquema de los eventos ocurridos en una partícula de TiO_2 en contacto con el medio, conteniendo un oxidante Ox_1 , y un reductor Red_2 . (13)

La fotocatalisis heterogénea es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (VIS o UV) por un sólido (el

fotocatalizador heterogéneo, que normalmente es un semiconductor de banda ancha). En la región interfacial entre sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción o de remoción de los contaminantes, sin que el catalizador sufra cambios químicos.

La Figura N^o. 1. Describe los eventos ocurridos en una partícula semiconductor al ser irradiada.

3.6. Características del fotocatalizador (ZnO) (2,14)

Existen diversos materiales con propiedades idóneas para actuar como catalizadores y llevar a cabo reacciones fotosensibilizadas como, por ejemplo, TiO₂, ZnO, CdS, óxidos de hierro, etc. La mayoría de estos materiales pueden excitarse con luz de no muy alta energía, absorbiendo parte de la radiación del espectro solar que incide sobre la superficie terrestre ($\lambda > 310$ nm). Los catalizadores mas investigados son el TiO₂ y los óxidos metálicos semiconductores de banda ancha como el ZnO.

Las características ventajosas para un catalizador las siguientes:

- Tener un área superficial
- Una distribución de tamaño de partícula uniforme
- Forma esférica de las partículas
- Ausencia de porosidad interna

El TiO₂ posee dos formas cristalinas. La anatasa parece ser la forma cristalina con mejores propiedades fotocatalíticas (ver figura N^o 2) y esto ha sido atribuido, entre otras razones, 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.

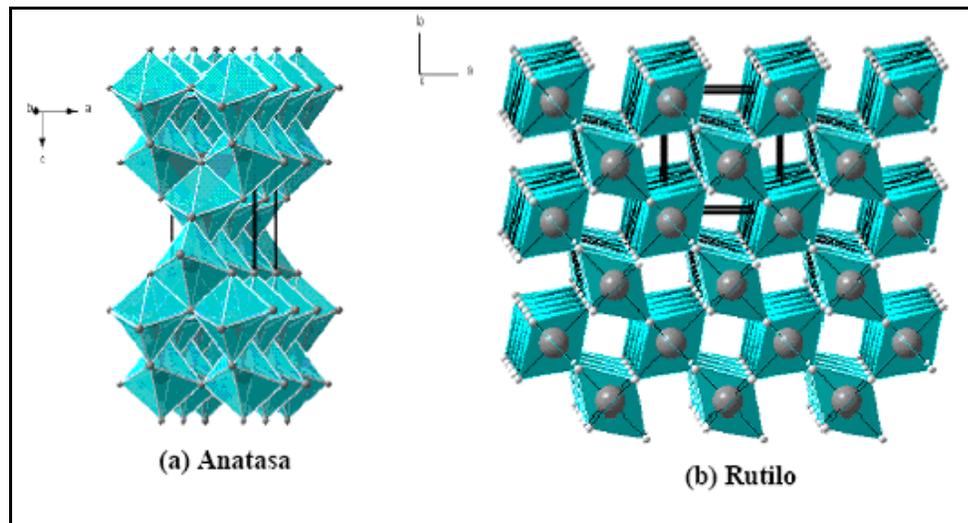
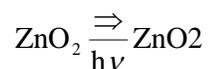


Figura N° 2: Estructura cristalina de TiO_2 (a) anatasa y (b) rutilo. (13)

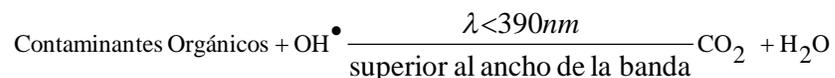
El uso del ZnO como fotocatalizador ha probado ser muy competitivo con respecto al TiO_2 , ya que promete ser útil en el tratamiento de aguas a gran escala por ser de bajo precio, y es similar o mejor que la forma de anatasa de TiO_2 . Además el zinc, por ser un metal pesado precipita al destruir los contaminantes por la fotocatálisis lo que lo pone en desventaja con el TiO_2 ya que este necesita ser removido de la suspensión. El óxido de zinc es conocido por ser semiconductor fotoactivo bajo radiación solar y su mecanismo de fotodegradación es similar al del TiO_2 . El ZnO es químicamente estable en el rango de pH de $4 < \text{pH} < 14$.



3.7. Introducción al método⁽¹³⁾

Muchas reacciones se pueden promover por la activación de sólidos a través de la luz, los cuales no se consumen en la reacción. Tales sólidos son conocidos como fotocatalizadores o fotosintetizadores y a menudo son semiconductores.

El ejemplo mas conocido de fotocatalisis por semiconductores; probablemente se da en la pintura, el proceso involucra la fotodegradación de cadenas poliméricas de la pintura catalizadas por el pigmento semiconductor, generalmente el TiO₂ o el ZnO. Hoy en día este fenómeno es controlado en gran parte cubriendo el pigmento con una capa acuosa de oxido inerte, comúnmente de silicio, aluminio o zirconio. En años recientes ha crecido el interés por el uso de semiconductores como fotosintetizadores para completar la mineralización oxidativa de contaminantes por O₂. En la fotocatalisis por semiconductores, para la purificación de aguas los contaminantes usualmente son compuestos orgánicos y por lo tanto el proceso general se puede resumir por la siguiente reacción:



En la fotomineralización por semiconductores como método de purificación de aguas no se utilizan oxidantes fuertes de naturaleza peligrosa, como los utilizados comúnmente en los métodos tecnológicos de tratamiento de aguas industriales (Cloración y Ozonización). Las tecnologías no destructivas utilizadas actualmente para el tratamiento de aguas industriales son:

Trampas de Aire y Absorción con Carbón; las cuales tienen sus complicaciones por ejemplo la remoción de contaminantes volátiles por:

Trampas de Aire: convierte un problema de contaminación líquido en un problema de contaminación del aire y la *Absorción con Carbón*: produce sólidos peligrosos que luego deberán depositarse en algún sitio.

La purificación de aguas por fotocátalisis con semiconductores esta atrayendo mucho interés por las siguientes razones:

- Es un método que destruye sustancias tóxicas (dioxinas, PCB's, disolventes, pesticidas, etc) hasta subproductos como agua, CO₂ y simples ácidos inorgánicos, en el caso de compuestos orgánicos. En el caso de metales pesados puede reducirlos a un estado de menor toxicidad.
- Las sustancias contaminantes son eliminadas en un único proceso sin necesidad de ser extraídas del medio en que se encuentran disueltas y usando energía procedente de una fuente limpia, abundante ecológicamente, barata e inagotable como es el sol.
- El proceso tiene lugar a temperatura ambiente y puede realizarse en combinación con cualquier otro tratamiento convencional.

3.8. Principio del Método.⁽¹³⁾

En un sólido los electrones ocupan las bandas de energía como consecuencia de una red extendida de enlaces. En un semiconductor las bandas de alta energía (ocupadas) y las bandas de baja energía (desocupadas) están separadas por una energía de brecha E_{bg} , la cual

corresponde a una región desprovista de niveles de energía. Como se muestra en la Figura N° 3.

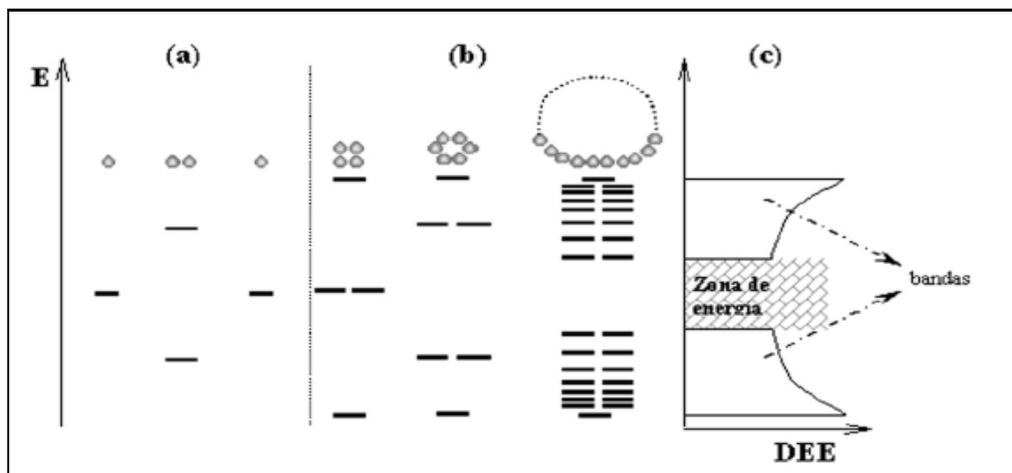


Figura N° 3: Niveles electrónicos resultante del enlace entre átomos idénticos. (a) Orbitales moleculares resultantes del solapamiento de dos átomos, cada uno con un único orbital atómico; (b) cadenas de 4, 6 y N átomos. (c) es la densidad de estados de energía (DEE) para una cadena infinita de átomos.

La activación de un semiconductor en fotocatalisis se lleva a cabo por absorción de un fotón con energía superior al ancho de banda (ver figura N° 4), lo cual resulta en la promoción de un electrón (e^-) de la banda de valencia a la banda de conducción con la generación de un hueco (agujero), (h^+) en la banda de valencia en fase acuosa , la superficie iluminada es consideradas ampliamente como un productor de radicales hidroxilos; estos y otros productos altamente oxidantes de esta fotoquímica indirecta continúan atacando los contaminantes oxidables.



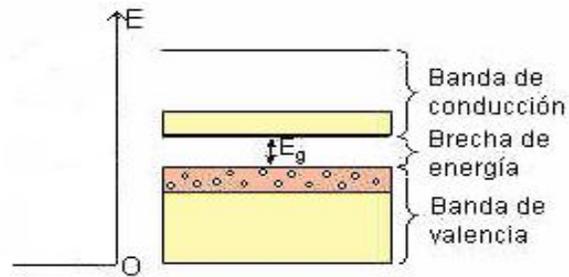


Figura N° 4: Distribución de las bandas o niveles energéticos de un semiconductor.

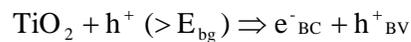
Los distintos procesos de foto-oxidación mencionados en la bibliografía normalmente emplean la luz conjuntamente con algún oxidante (ozono, peróxido de hidrógeno y/o oxígeno, etc).

Esto es debido a que la luz solar o que el oxidante solo produce la destrucción parcial del contaminante, el uso simultáneo de luz y un oxidante han demostrado rutinariamente que produce mineralización completa del carbono orgánico a dióxido de carbono CO_2 .

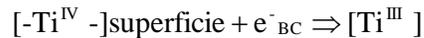
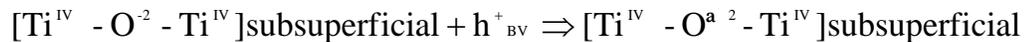
Sin embargo podemos indicar que un proceso ideal de fotocatalisis heterogénea sería aquella transformación química de reactivos en productos que tuviese las siguientes características:

- La entidad de fotocatalizador (ZnO) permanece inalterada una vez finalizado el proceso.
- La reacción es exoenergética y solo es acelerada por la iluminación que la provoca.
- Se generan huecos y electrones en el fotocatalizador que son necesarios para el proceso.
- Los productos específicos resultantes son diferentes que los que se obtendrían en fase homogénea.

La función fotoquímica primordial, después de la absorción de luz en el UV – cercano por las partículas de TiO_2 (longitudes de ondas $<$ a 380 nm), es la generación de pares electrón / hueco cuya separación en electrones en la banda de conducción (e^-_{BC}) y huecos en la banda de valencia (h^+_{BV}) es ayudada por el gradiente del campo eléctrico en el espacio de la región de carga, según la ecuación:



Estas partículas cargadas eléctricamente se mueven rápidamente a la superficie donde son captadas en trampas de energía sub-superficiales del catalizador [$\text{Ti}^{\text{IV}} - \text{O}^{-2} - \text{Ti}^{\text{IV}}$], para los huecos y trampas superficiales [$-\text{Ti}^{\text{IV}}-$] para los electrones.



Estas trampas de energía son debidas al hecho que en la superficie de la partícula semiconductor queda truncada la malla cristalina provocando una serie de irregularidades al quedar los átomos de titanio y oxígeno rodeados solo parcialmente por otros átomos. La consecuencia de esto es la existencia de una serie de átomos de un estado energético distinto al que se tiene en el interior de las partículas y con capacidad de retener los electrones y los huecos generados.

Estos agujeros y electrones también pueden quedar fijados externamente a la superficie del catalizador vía transferencia electrónica con donadores o aceptores de electrones absorbidos sobre el TiO_2 . Esto quiere decir que si

además existe la presencia en el medio de una pareja de compuestos apropiados para llevar a cabo una reacción de *oxidación – reducción* (redox), las partículas portadoras de cargas dan lugar a las siguientes reacciones:

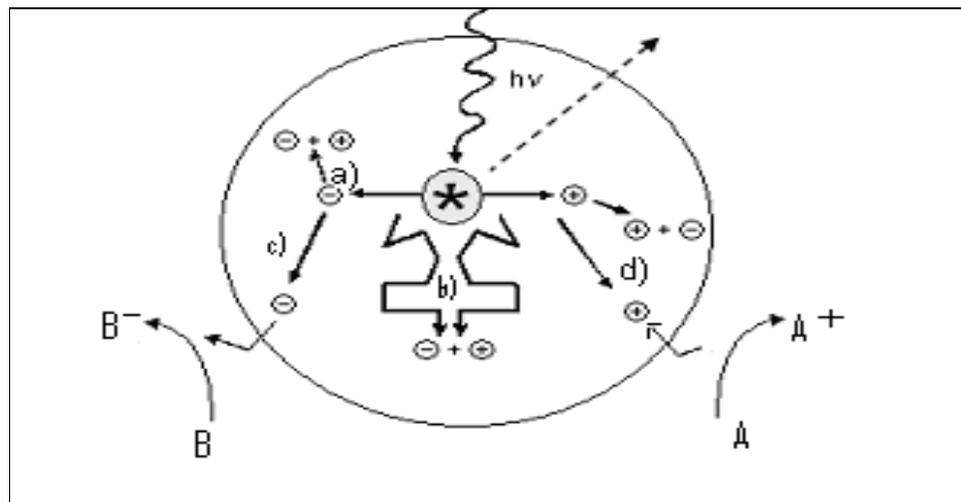
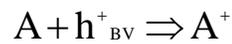
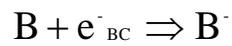
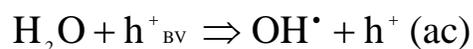
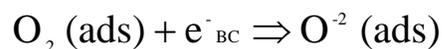


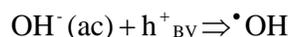
Figura N° 5: Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor – electrolito bajo iluminación.

El elemento **B** es el oxidante que, normalmente suele ser oxígeno introducido en el sistema mediante inyección de oxígeno ó de aire. Este elemento oxidante también puede ser obtenido mediante la adición de agua oxigenada previamente al proceso de iluminación. El elemento **A** es el reductor. En la figura N° 5 se muestra una representación esquemática de una partícula de semiconductor así como sus características energéticas y termodinámicas.

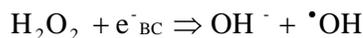
En fase acuosa y con la adición de oxígeno molecular como elemento oxidante, tenemos las ecuaciones siguientes:



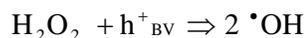
Otra posibilidad de la ecuación anterior es:



En este caso es el agua el que actúa como elemento reductor produciendo radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) en la superficie del catalizador. Si en vez de oxígeno el elemento oxidante se obtiene mediante la adición de peróxido de hidrogeno la ecuación que se tiene es:



o también el agua oxigenada se puede descomponer directamente en radicales hidroxilo en presencia de iluminación:



Y estos radicales, altamente son encargados de atacar los contaminantes oxidantes. En particular, es bien conocido que los radicales ($\bullet\text{OH}$) reaccionan rápidamente con la mayoría de los compuestos orgánicos.

Paralelamente a todo este proceso también puede existir una rápida recombinación electrón/hueco en la superficie de la partícula del catalizador:

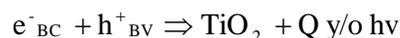


Tabla N° 3: Reacciones involucradas en el proceso de degradación fotocatalítica.

	Procesos Primarios		Tiempo Característico
1	Fotogeneración	$\text{TiO}_2 + h\nu \Rightarrow h^+_{\text{BV}} + e^-_{\text{BC}}$	fs
2	Captura de los Portadores de Carga	$h^+_{\text{BV}} + >\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH} \Rightarrow \{>\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}\}^{\circ+} (h^+_{\text{cap}})$ $e^-_{\text{BC}} + \text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH} \Rightarrow \{>\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}\}^- (e^-_{\text{cap}})$	25 ns < 30 ps
3	Recombinación de los Portadores de carga	$h^+_{\text{BV}} + e^-_{\text{BC}} \Rightarrow \text{TiO}_2$ $h^+_{\text{cap}} + e^-_{\text{BC}} \Rightarrow \text{TiO}_2$ $h^+_{\text{BV}} + e^-_{\text{cap}} \Rightarrow \text{TiO}_2$ $h^+_{\text{cap}} + e^-_{\text{cap}} \Rightarrow \text{TiO}_2$	100 ns
4	Procesos de transferencia de carga	$h^+_{\text{BV}} ; h^+_{\text{cap}} + \text{D} \Rightarrow \text{D}^{\circ+}$ $e^-_{\text{BC}} ; e^-_{\text{cap}} + \text{A} \Rightarrow \text{A}^{\circ}$ $\{>\text{Ti}^{\text{V}}\text{OH}\}^{\circ+} + \text{D} \Rightarrow \text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH} + \text{D}^{\circ+}$ $\{>\text{Ti}^{\text{III}}\text{OH}\}^- + \text{A} \Rightarrow \text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH} + \text{A}^{\circ-}$	100 ns

Esta recombinación puede tener lugar incluso en el caso de electrones y huecos atrapados energéticamente. Para prevenir esta recombinación, los electrones pueden ser retirados mediante oxígeno molecular pre-absorbido para dar lugar al radical $\text{O}_2^{\circ-}$ (ads). También puede ser evitada esta recombinación mediante el dopado del catalizador con metales como el wolfranio, cobre, hierro y vanadio en porciones alrededor del 5%. Este dopado provoca la generación de irregularidades en la malla cristalina que favorecen la captura de huecos y electrones.

Para que un fotocatalizador sea eficiente, los diferentes procesos de transferencia electrónica que involucran electrones (e^-) y huecos (h^+) reaccionantes con las especies adsorbidas en la interfase deben competir eficientemente con la ruta principal de desactivación de las recombinaciones del par electrón – hueco. (Ver tabla N° 3)

3.9. Cinética del Proceso de Fotocatálisis. (2,13,16)

Numerosos estudios han demostrado que la adsorción de compuestos químicos en la superficie de semiconductores sigue la isoterma de adsorción de Langmuir. También se ha observado que la velocidad de degradación de compuestos químicos por fotocatalisis heterogénea sigue el modelo cinético de Langmuir – Hinselwood (L -H).

La isoterma de adsorción de Langmuir asume que, el equilibrio, el número de lugares superficiales para la adsorción es fijo, y que en un lugar superficial sólo puede ser ocupado por un substrato idéntico para todos los lugares.

Según Langmuir – Hinselwood para reacciones catalíticas heterogéneas, la velocidad de una reacción superficial unimolecular es proporcional al recubrimiento superficial, el cual puede relacionarse con la concentración en equilibrio del reactivo en fase homogénea a partir de la isoterma de adsorción de Langmuir. De acuerdo con esto, el modelo cinético de Langmuir – Hinselwood acepta que la isoterma de adsorción describe adecuadamente la relación entre el recubrimiento superficial de la especie **A**

en la superficie del catalizador, θ_A , y γ , la actividad, a_A , (o la concentración C_A) de la misma especie presente en la fase fluida.

Este hecho indica que la especie **A** se encuentra en equilibrio de adsorción – desorción (en oscuridad) entre la superficie del catalizador y la fase fluida. La relación matemática es de la forma:

$$\theta = (K_{ads}a) / (1 + K_{ads}a) = (K_{ads}C\gamma) / (1 + K_{ads}C\gamma) = (K'_{ads}C) / (1 + K'_{ads}C)$$

Donde:

θ = es el recubrimiento superficial.

a = es la actividad del substrato en la solución acuosa.

C = es la concentración inicial del substrato.

γ = es el coeficiente de actividad del substrato.

K'_{ads} = es la constante aparente de equilibrio de adsorción (coeficiente de adsorción.).

De acuerdo con lo comentado anteriormente, la velocidad de la degradación fotocatalítica obedecerá una ecuación de la forma:

$$r = -dC / dt = k\theta = (kKC) / (1 + KC)$$

Donde k = es la constante aparente de velocidad de la reacción que transcurre en el centro activo de la superficie del catalizador.

Otra asunción implícita al modelo de Langmuir – Hinselwood es que las velocidades de adsorción – desorción superficial del substrato son mayores que las de cualquier reacción química posterior y, por lo tanto el paso limitante de la velocidad es la reacción de las especies adsorbidas en las

superficies del semiconductor. Por último, también asume que los productos de la reacción no bloquean los centros activos.

La interpretación formal de K es diferente para cada esquema de reacción. Por ejemplo, *Turchi y Ollis* han propuesto cuatro posibles esquemas de reacción para el ataque del radical $\cdot OH$ en reacciones de degradación fotocatalítica sobre TiO_2 .

En todos ellos, la ecuación de velocidad tiene la misma forma que la propuesta en la ecuación 15. No obstante, la interpretación fundamental de la constante K es diferente en cada caso, y ninguna es completamente equivalente a la isoterma de adsorción en oscuridad. Conviene mencionar que los valores de K medidos a partir de isotermas de adsorción en oscuridad acostumbran a ser menores que los obtenidos a partir de estudios cinéticos de degradación fotocatalítico sobre superficies irradiadas de semiconductores.

La constante de velocidad, k , es una constante de proporcionalidad que da una medida de la reactividad intrínseca de la superficie fotoactivada frente al substrato.

Se ha visto también que k es proporcional al I_a^θ , donde, I_a es la velocidad con que la superficie del semiconductor absorbe luz de energía superior a su salto de banda y θ es un exponente igual a 0.5 o 1, respectivamente, a elevadas o bajas intensidades.

De esta manera, solo se pueden comparar las constantes de velocidad de diferentes reactivos cuando el catalizador y las fuentes de iluminación utilizadas son las mismas.

Aunque K y k se supone que son parámetros independientes, de hecho, parecen depender el uno del otro. Este comportamiento es consecuencia del cambio que experimentan las constantes de adsorción de equilibrio en presencia de irradiación. De hecho, la irradiación puede inducir a la fotoadsorción o fotodesorción de los substratos sobre la superficie del catalizador. En estos casos K parece ser una función de la intensidad de la luz de la misma manera que lo es k .

La ecuación de velocidad se puede escribir de la siguiente manera:

$$1 / r = 1 / k + 1 / kK + 1 / C$$

Así, la linealidad de una representación de $1 / r$ vs $1 / C$ prueba la validez del modelo de Langmuir – Hinselwood, donde $1 / k$ es el punto de corte con el eje de ordenadas y $1 / (kK)$ es la pendiente de la recta. Muchas reacciones fotocatalíticas muestran buena linealidad en estas representaciones. Desafortunadamente, este ajuste no se puede tomar como una prueba sólida de preadsorción del substrato y del oxidante sobre el catalizador porque esta misma ley de velocidad puede describir también la cinética de reacciones que transcurren en fase homogénea, o en los cuales el substrato está adsorbido y el oxidante libre, o el oxidante adsorbido y el substrato libre. Con el fin de tratar reacciones que involucran la competición, entre dos o más especies por único lugar de adsorción, se ha sugerido la siguiente expresión:

$$R = -dC / dt = k\theta = (kKC) / (1 + KC + \sum K_i C_i)$$

Donde i es una especie adsorbida competitivamente, que puede ser, por ejemplo, una molécula de disolvente, intermedio de la reacción, otro reactivo o algún componente no reactivo presente en la disolución. De la misma manera que en otras áreas de la catálisis heterogénea, estas adsorciones simultáneas influyen en la cinética de reacción observada.

3.10. Parámetros que influyen en el proceso. ^(2,16)

Un gran número de parámetros influyen tanto cualitativa como cuantitativamente en el proceso de oxidación-reducción fotocatalizado y que, como consecuencia, resultan determinantes en la eficiencia global del proceso. A continuación se mencionan algunos de los más importantes:

- *ph.* : Normalmente, 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, y ello se manifiesta en alteraciones de la velocidad de degradación y en la tendencia a la floculación del catalizador.
- *Características del catalizador*: las características ventajosas para un fotocatalizador son una alta área superficial, una distribución de partícula uniforme, forma esférica de las partículas y ausencia de porosidad interna. Normalmente se emplean polvos cuyas partículas tienen radios micrométricos.

- *Propiedades ópticas del semiconductor:* los semiconductores de interés fotocatalítico son sólidos (generalmente óxidos o calcogenuros) donde los átomos constituyen una red tridimensional infinita. El solapamiento de los orbitales atómicos va mas allá de los primeros vecinos, extendiéndose por toda la red; resulta entonces una configuración de estados deslocalizados muy próximos entre si, que forman bandas de estados electrónicos permitidos. La construcción de la configuración electrónica se esquematiza en la figura N° 3.

Entre las bandas, hay intervalos de energía en los cuales hay estados electrónicos “permitidos”, cada uno de estos intervalos es una “banda de energía prohibida” o *gap*. A los fines la fotocatalisis y de la mayoría de las propiedades químicas y físicas de los sólidos, las bandas que limitan el gap de interés son la banda de valencia (BV), de menor energía y la banda de conducción (BC) de mayor energía. Ambas bandas surgen del solapamiento de los niveles atómicos de los electrones de valencia y según su grado de ocupación, contienen los niveles ocupados mas altos y los niveles desocupados mas bajos y esto es lo que se conoce como: “Efecto Cuántico de Tamaño.”(ver figura N° 3)

3.11. Aplicaciones potenciales

Productos farmacéuticos:

La producción de antibióticos y otros fármacos genera residuos intrínsecamente biocidas que no pueden ser tratados mediante sistemas biológicos. Tanto los procesos de limpieza periódica o de residuos de los

propios procesos de fabricación pueden generar aguas contaminadas. La figura N° 6 muestra un ejemplo de degradación de aguas residuales de una industria farmacéutica; dos catalizadores comerciales distintos (ambos TiO_2) Demostraron similar, y adecuada efectividad.

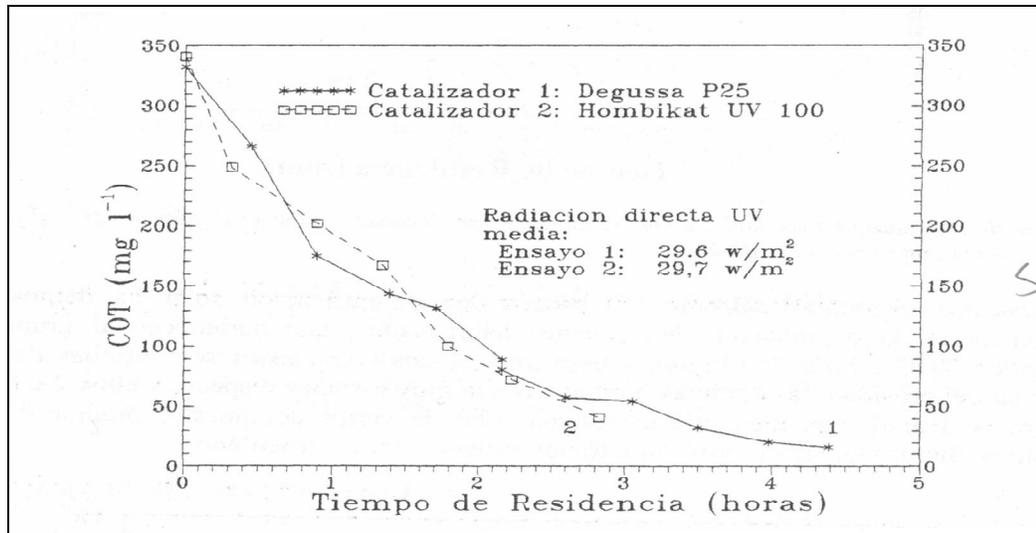


Figura N° 6: Degradación de aguas residuales de procesos de una industria farmacéutica, utilizando luz solar y 200mg/L de TiO_2 en suspensión.

- Desinfección de agua.

El cloro es el producto químico más comúnmente utilizado para la desinfección de agua debido a su capacidad para inactivar bacterias y virus. Sin embargo, la presencia de impurezas orgánicas en el agua pueden generar subproductos no deseados, tales como halometanos y otros compuestos cancerígenos; por estas razones se está estudiando la factibilidad de aplicar en ciertos casos tecnologías alternativas de desinfección de aguas. Entre ellas se encuentra el uso de radiación ultravioleta de 254nm, mediante lámparas. El proceso de fotocatalisis mediante TiO_2 utilizando luz solar con longitudes de onda desde 290 hasta

400nm es mucho menos activo como germicida. Sin embargo, el efecto antibacteria ha sido demostrado en varios microorganismos, incluyendo *Escherichia Coli*₍₁₉₎, *Lactobacillus Streptococos*, etc. (ver figura N° 7), y también se ha informado la desinfección de virus tales como Phage MS2 y Poliovirus1.

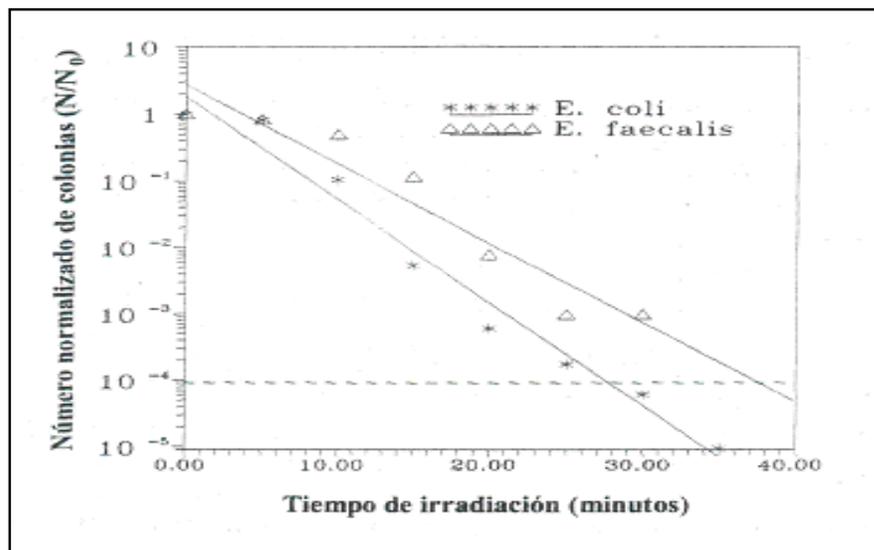


Figura N° 7: Ejemplo de aniquilación de bacterias en agua mediante fotocátalisis, utilizando TiO_2 , luz y tecnología solar. (25,26)

En todos los casos la oxidación superficial inducida fotocatalíticamente produce una división entre la pared de la célula y la membrana resultando en su desintegración y por tanto, en la aniquilación de las bacterias existentes en el medio.

3.5.10. Seguimiento del proceso fotocatalítico.(3,10,11,19,20)

En definitiva, en las aplicaciones practicas del proceso de degradación oxidativa, no basta la mera desaparición de los contaminantes; es

imprescindible también la conversión de, al menos un importante porcentaje de carbón orgánico en carbón inorgánico, en CO_2 . El fin del proceso es la mineralización completa de todo el carbono orgánico, para asegurar que tanto el contaminante como cualquier otro producto intermedio formado durante el proceso fotocatalítico han sido degradados. Por tanto para un adecuado seguimiento del proceso fotocatalítico se utiliza una amplia variedad de mediciones químicas; las más importantes según nuestra investigación son:

- ***Demanda Química de Oxígeno (DQO)***. Es la medida del oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación contenida en una muestra. Su determinación se basa en la oxidación enérgica de la materia orgánica e inorgánica que se encuentra en el agua, en un medio fuertemente ácido con una solución valorada de dicromato de potasio. Los valores de este parámetro están asociados al grado de avance de la oxidación de los contaminantes, por lo que la determinación seriada de DQO es una herramienta útil de seguimiento del proceso.

- ***Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)***. Este parámetro se obtiene mediante una prueba empírica estándar, y mide la cantidad de oxígeno utilizado para la biodegradación de materia orgánica e inorgánica contenida en una muestra. La prueba usa un tiempo fijo de incubación la medición de oxígeno consumido en un período de 5 días (DBO₅). Puede medirse también el oxígeno consumido hasta que no haya modificación

alguna en la concentración de éste, lo que puede tomar entre 30 y 90 días de incubación (DBO_{ultima}). El procedimiento es sencillo: se determina el oxígeno disuelto al inicio y al final del tiempo de incubación preestablecido. La DBO es simplemente la diferencia entre la concentración inicial y final de oxígeno disuelto.

- **Carbono Orgánico Total (COT).** Mide la cantidad de dióxido de carbono producido en la mineralización total de una muestra. A diferencia del DQO, su valor es independiente del estado de oxidación de los compuestos presentes en el sistema.

CAPITULO IV
DISEÑO METODOLOGICO

4.0 DISEÑO METODOLOGICO

4.1. Tipo de estudio: Retrospectivo, prospectivo y analítico-experimental.

- **Retrospectivo:** es aquel en el cual se realiza una medición actual y se compara con datos obtenidos en el pasado.
- **Prospectivo:** es un estudio actual que se realiza en un tiempo determinado.
- **Analítico-experimental:** cuando una investigación trata con datos y se esperan de los resultados sean matemáticamente interpretables los cuales conducen a conclusiones y pueden diseñarse o desarrollarse instrumentos para medirlos, y esto permite al mismo tiempo resolver los fenómenos y problemas que se están estudiando.

4.2. Metodología:

La siguiente investigación se realizó en tres etapas:

- Investigación bibliográfica
- Investigación de campo
- Investigación de laboratorio

4.2.1. Investigación bibliográfica:

- Biblioteca Central de la Universidad de El Salvador.
- Biblioteca de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador.
- Biblioteca de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente de la Universidad de El Salvador.

- Journal de Fotoquímica y Fotobiología, Elsevier Science.
- Sitios de Internet.

4.2.2. Investigación de campo:

Universo: Constituido por las aguas residuales provenientes de las líneas de producción del área de líquidos (jarabe de ambroxol y suero oral oraldex) y del área de semisólidos (crema fría artrisport) del laboratorio en estudio.

Muestra: Se recolectaron un total de 6 muestras, 4 muestras se tomaron del área de líquidos dejando 2 para aplicar el método fotocatalítico y 2 como control. Las 2 muestras restantes se tomaron del área de semisólidos tomando 1 para aplicar el método antes mencionado y la otra muestra se dejó como control. (Ver Figura N° 8).



Figura N° 8: Muestreo de aguas residuales de producción del laboratorio farmacéutico. Los frascos con tapadera blanca son las muestras para los análisis previos al tratamiento fotocatalítico y los frascos con tapadera verde son las muestras para el tratamiento fotocatalítico y análisis posteriores.

4.2.3. Investigación de laboratorio

Puntos de muestreo

Se establecieron los puntos de muestreo de aguas residuales, tomando dos muestras por cada línea de producción de suero oral oraldex, jarabe de ambroxol y crema fría artrisport, utilizando una muestra como control y la otra para aplicar el método fotocatalítico. (Ver Figura N° 9)

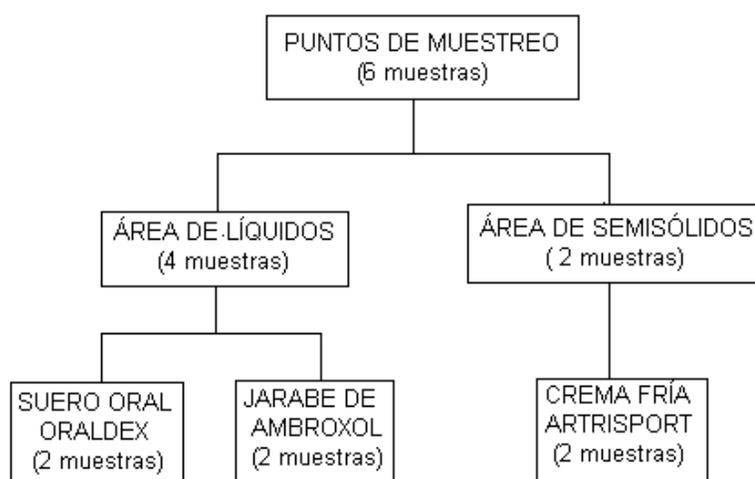


Figura N° 9: Puntos de muestreo tomados para la recolección de las aguas residuales provenientes de las líneas de producción en estudio.

Esquema de trabajo de la degradación fotocatalítica de aguas residuales provenientes de las líneas de producción seleccionadas del laboratorio en estudio.

Las dos muestras de agua residual de la misma línea de producción fueron tomadas con la finalidad siguiente: la primer muestra control se utilizó para determinar el grado de contaminación del agua residual antes del tratamiento fotocatalítico, realizándole análisis según la NSO 13.49.01:06

aplicada para aguas residuales y a la vez análisis de los parámetros críticos según la NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable. La segunda muestra fue sometida al tratamiento fotocatalítico. (ver Figura N° 10).

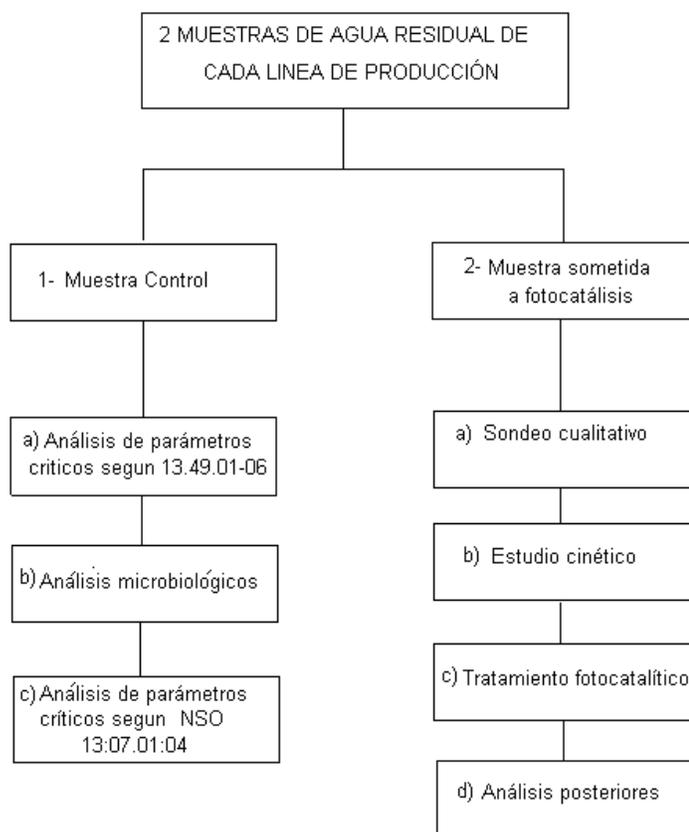


Figura N° 10: Esquema de trabajo de degradación fotocatalítica de aguas residuales.

4.3 Parte Experimental

4.3.1. Sondeo cualitativo del tipo de agua de la muestra

Se tomaron los espectros UV-VIS de la muestra, con el propósito de conocer las bandas de absorción características de los compuestos químicos presentes en la muestra proveniente del lavado del equipo industrial.

4.3.2. Estudio Cinético (2,5,16)

Se realizó un estudio cinético para estimar el tiempo de residencia o tiempo de radiación (tiempo de la reacción de fotodegradación de los contaminantes) necesario para determinar así el momento en el que se logra la fotodegradación de todos aquellos fármacos y compuestos orgánicos que se encuentren disueltos en el agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport.

Se determinó por espectroscopia UV-VIS el componente o contaminante disuelto en el agua residual que más tiempo necesitó para su fotodegradación.

Se tomó como base este contaminante, para estimar el tiempo de residencia total de acuerdo con la ley cinética encontrada para el agua residual en estudio, puesto que es el que limita la velocidad total de fotodegradación de los contaminantes presentes.

Los estudios cinéticos fueron realizados a tres pH diferentes, ácido, neutro y básico con el propósito de medir el efecto del pH en la velocidad de reacción y establecer el pH en el que se obtiene una cinética de reacción más rápida.

4.3.3. Procedimiento del tratamiento fotocatalítico (Ver figura N° 11)

-. Se midió una muestra de 1L con una probeta, posteriormente se colocó en un erlenmeyer de 1000 mL y se tomó el pH inicial. -. Se pesó en una balanza analítica la cantidad exacta de 1.00 g de óxido de zinc y se adicionó a la muestra tomada anteriormente.

- Se ajustó el pH de la suspensión, al pH que mejores resultados se obtuvieron según el estudio cinético.
- Se colocó la muestra por 20 minutos en el ultrasonido para minimizar el tamaño de partícula del fotocatalizador (óxido de zinc), obteniendo partículas finamente divididas para que se produzca el efecto cuántico de tamaño sobre el cual se fundamenta la técnica de fotocatalisis.⁽¹⁵⁾ (Ver anexo N° 2)
- Posteriormente se colocó la muestra con agitación magnética exponiéndola a una irradiación de luz ultravioleta (UV)⁽⁴⁾, utilizando una lámpara de Arco de Xenón de alta presión de 150 Watts, la cual produjo la energía necesaria capaz de generar transiciones electrónicas por absorción de la luz en el fotocatalizador. A partir de este momento se comenzó a tomar el tiempo de la reacción, utilizando un cronómetro para determinar el tiempo. (Ver anexo N° 3)
- En cada intervalo de tiempo establecido en el estudio cinético se tomaron alícuotas de 2.0 mL de la suspensión y se colocaron en tubos de hemólisis los cuales se protegieron de la irradiación ultravioleta. (Ver anexo N° 4)
- Inmediatamente se llevaron a centrifugar los tubos con la finalidad de remover el óxido de zinc de la suspensión.
- Finalmente se tomaron los espectros UV-VIS de cada una de las alícuotas de los diferentes intervalos de tiempo establecidos. (Ver anexo N° 5)
- Se seleccionaron las bandas características de la muestra para seguir la cinética de fotodegradación de los contaminantes en la muestra.

- Se ajustaron los datos obtenidos de absorbancia y tiempo con modelos matemáticos cinéticos para establecer la ley de velocidad de fotodestrucción de los contaminantes en la muestra.

(Este mismo procedimiento se efectuó para las demás muestras de aguas residuales provenientes de las líneas de producción en estudio).



Figura N° 11: Procedimiento del tratamiento fotocatalítico

4.3.4 Análisis Posteriores

Después de tratamiento fotocatalítico se colocaron las muestras analizadas en refrigeración para su posterior análisis verificando su cumplimiento con la Norma Salvadoreña Obligatoria para Aguas Residuales NSO 13.49.01:06 comparando los resultados de los análisis realizados con la muestra que no fueron sometida al tratamiento fotocatalítico.

Se realizaron análisis de los parámetros críticos según la institución gubernamental en la que se efectuaron basándose en la Norma Salvadoreña Obligatoria para la Calidad de Agua Potable NSO 13:07.01:04 como son: pH, color, turbidez, zinc total, manganeso total, hierro total, sulfatos, dureza, y como análisis microbiológicos los siguientes: determinación de *Coliformes totales*, *Coliformes termotolerantes*, *Escherichia coli*.

Se comparó con esta norma debido a que la matriz que se utiliza para el agua residual fue agua potable.

CAPITULO V
RESULTADOS E INTERPRETACION

5.0 RESULTADOS E INTERPRETACION

5.1. Sondeo cualitativo de muestras de agua residual

Se tomaron muestras de agua residual provenientes de las líneas de producción del área de líquidos (jarabe de ambroxol y suero oral oraldex) y del área de semisólidos (crema fría artrisport) del laboratorio en estudio y se trataron fotocatalíticamente en presencia de 1 g/L de fotocatalizador ZnO a temperatura ambiente y a un pH ácido de aproximadamente de 6.0 unidades de pH. El comportamiento de degradación de los contaminantes disueltos en las aguas se monitoreó tomando los espectros UV-VIS a diferentes tiempos de irradiación.

5.2. Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol

La figura N° 12 muestra el espectro UV-VIS en función del tiempo de irradiación de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol a pH de 6.5 donde la degradación fotocatalítica fue mas rápida comparado con los pHs neutro y básico, se observan dos bandas de absorción en las cuales sus máximos se sitúan aproximadamente a 195 y 251 nm de longitud de onda.

Se observa que la banda de 251 nm decae su intensidad con el aumento en el tiempo de irradiación, mientras que la banda de 195 nm no cambia su intensidad con el tiempo de irradiación. La banda de absorción de 251 nm la cual se presume que se debe a la absorción neta de los contaminantes orgánicos disueltos en el agua y puesto que decae con el tiempo de

irradiación demuestra que estos contaminantes orgánicos se están degradando fotocatalíticamente durante el proceso del tratamiento.

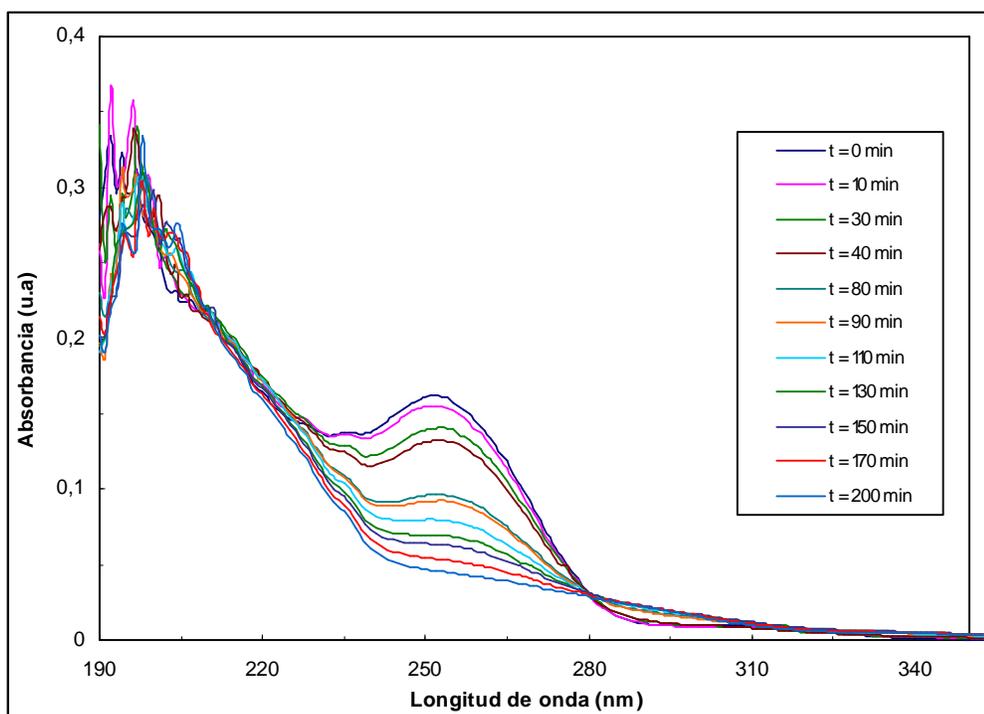


Figura N° 12: Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol 10 ppm a pH= 6.5 utilizando ZnO y radiación UV-VIS. Los tiempos de muestreo fueron desde 0 a 470 minutos tomados en intervalos de 10 minutos. En el gráfico se muestran algunos espectros representativos del experimento.

La figura N° 13 presenta el espectro UV-VIS de cloruro de sodio, jarabe de ambroxol y solución de fenol 10 ppm, en los cuales se nota que la absorción de las sales y del fenol se presenta en la misma región que la banda de 195 nm de las aguas residuales provenientes de la producción de jarabe de ambroxol. La banda situada a 195 nm no decae con el tiempo de irradiación posiblemente porque se deba a la absorción de sales inorgánicas disueltas en el agua residual que se encuentran en su máximo estado de oxidación

por lo que ya no pueden ser oxidadas y a la presencia de fenol que es utilizado en la limpieza y desinfección del equipo de producción con solución de fenol al 4%.

El fenol presenta un espectro UV-VIS con dos bandas de absorción características cuyos máximos se sitúan alrededor de 210 y 270 nm de longitud de onda, sus coeficientes de absorción molar son 6,200 y 1,450 $M^{-1} cm^{-1}$, respectivamente. La banda de 210 nm es de tipo E (banda etilénica) y la banda de 270 nm es de tipo B (banda bencenoide) ambas bandas del fenol son debidas a transiciones electrónicas de orbitales pi-enlazantes a pi-antienlazantes, $\pi \rightarrow \pi^*$. (4)

El decaimiento de la banda a 210 nm del fenol no se manifiesta hasta después de aproximadamente 300 minutos de irradiación, por lo que no se observa disminución en la intensidad de la banda a 195 nm de las aguas residuales de jarabe de ambroxol. La banda a 270 nm del fenol solapa con la banda a 251 nm debida a los contaminantes orgánicos disueltos en el agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, razón por la cual el decaimiento en la intensidad observado en la banda a 251 nm es debido a la fotodegradación del fenol y a los contaminantes orgánicos disueltos.

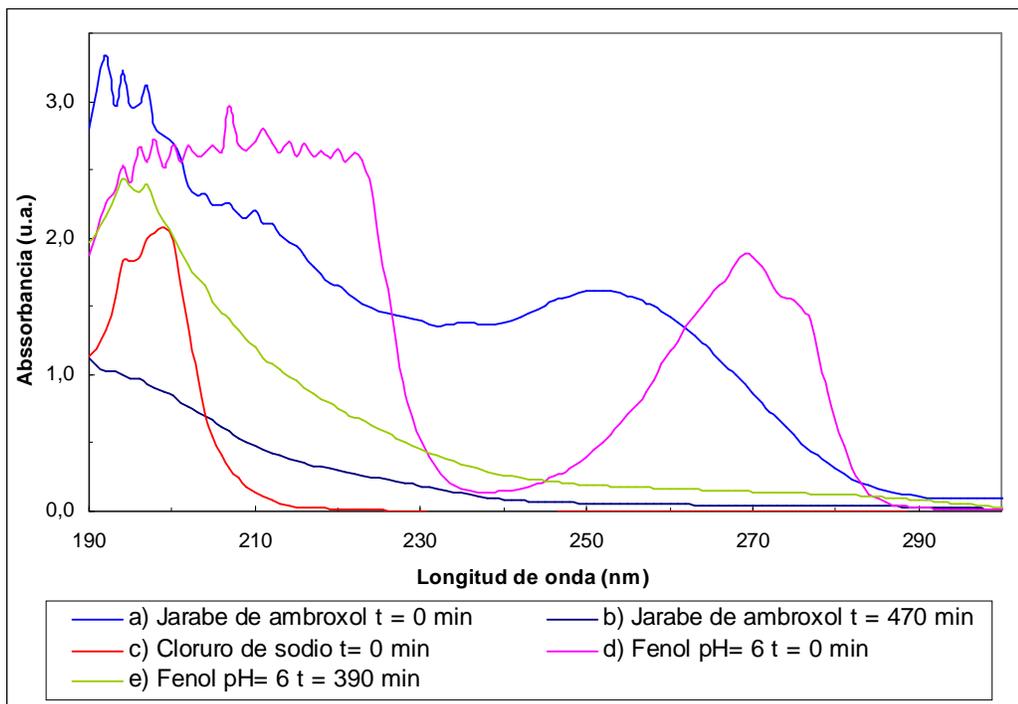


Figura N° 13: Espectros UV-VIS de fenol, ambroxol y cloruro de sodio.

(a) y (b) jarabe de ambroxol a 10 ppm a pH= 6.5 irradiado en un tiempo de 0 y 470 minutos respectivamente. (d) y (e) espectro UV-VIS del fenol 12 ppm a pH= 6 irradiado con luz ultravioleta en un tiempo de 0 y 390 minutos respectivamente. (c) cloruro de sodio a 10 ppm sin ser irradiado en un tiempo de 0 minutos.

5.3 Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex.

La figura N° 14 muestra el espectro UV-VIS en función del tiempo de irradiación de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH= 6 donde la degradación fotocatalítica fué más rápida comparado con los pHs neutro y básico, en el cual se observa tres bandas de absorción que presentan sus máximos aproximadamente a 195, 234 y 270 nm de longitud de onda.

La banda de 270 nm aumenta con el incremento del tiempo de irradiación, mientras que la banda de 234 nm decae con el aumento en el tiempo de irradiación, la banda a 195 nm no cambia con respecto al tiempo de irradiación. Puesto que se debe a la absorción de sales y fenol tal como se explicó en la sección anterior.

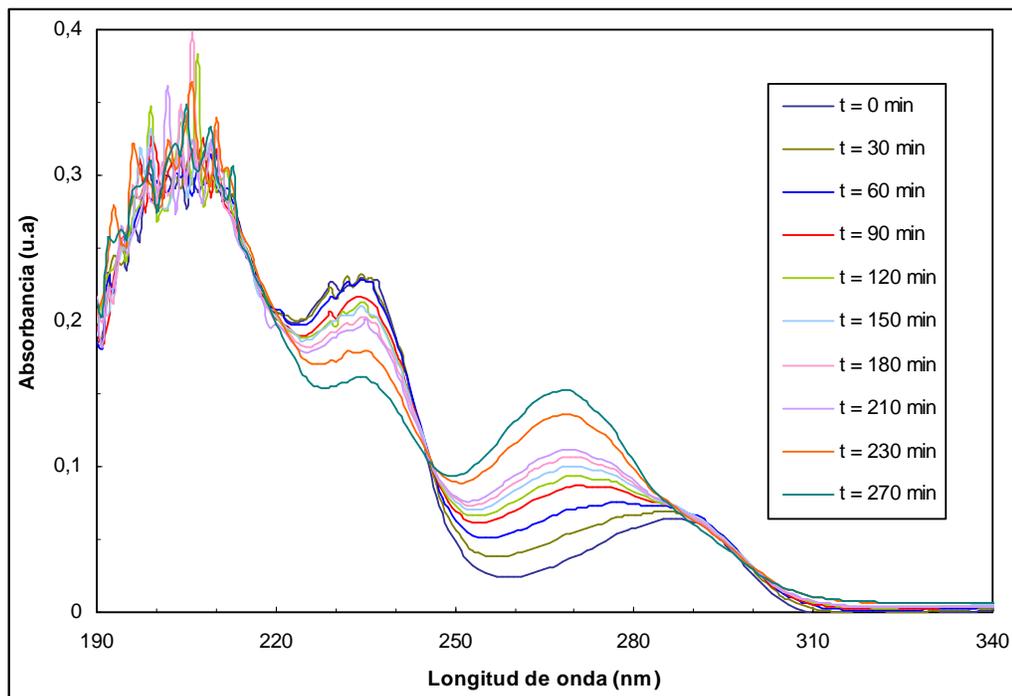


Figura N° 14: Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH= 6 utilizando ZnO y radiación UV-VIS. Los puntos de muestreo fueron tomados de 0 hasta 270 minutos a intervalos de 10 minutos. En el gráfico se muestran algunos espectros representativos del experimento.

La banda a 234 nm que decae con el aumento en el tiempo de irradiación, corresponde a la suma de todas las absorbancias de los contaminantes

orgánicos disueltos, muestra la degradación fotocatalítica de ellos durante el proceso del tratamiento fotocatalítico.

La banda a 234 nm corresponde a la suma de las absorbancias de los precursores de las sustancias formadas durante la reacción fotooxidativa, por esa razón se observa un aumento en la intensidad de la banda situada a 270 nm. La banda de 234 y la banda de 270 nm se encuentran separadas por un punto isobéptico a 245 nm, lo que demuestra que las especies químicas que absorben a 234 nm son precursoras de las especies que absorben a 270 nm.

La banda localizada a 195 nm corresponde a las sales inorgánicas disueltas en la muestra de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex y fenol utilizado como desinfectante en la limpieza. De nuevo se observa que las sales inorgánicas disueltas no son degradadas por los radicales oxidrilos por encontrarse en su estado máximo de oxidación y el fenol necesita más tiempo para ser degradado fotocatalíticamente, como se demostró en la sección anterior.

5.4. Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport

En la figura N° 15 se muestra el espectro UV-VIS en función del tiempo de irradiación de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport a pH de 6, donde la degradación fotocatalítica fue más rápida comparado con los pHs neutro y básico. Se observan tres bandas que presentan sus máximos alrededor de 195, 219 y 270 nm de longitud de

onda. La banda a 219 nm posee un “hombro” que decae con el aumento del tiempo de irradiación al igual que la banda a 270 nm, mientras que la banda a 195 nm decae a partir de los 150 minutos del tiempo de irradiación.

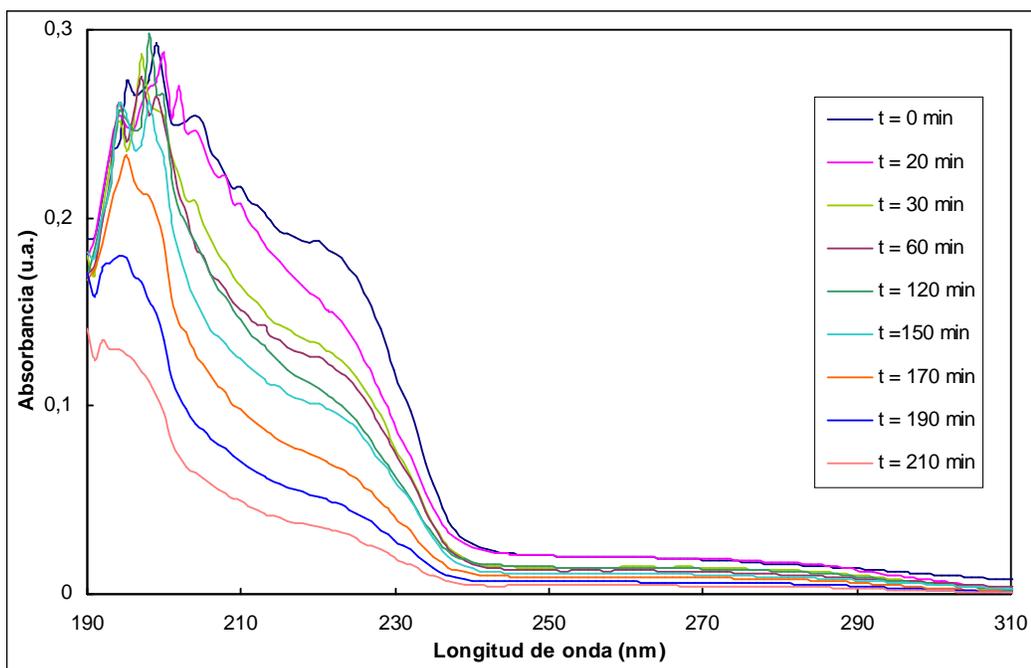


Figura N° 15: Degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrisport, a pH= 6 utilizando ZnO y radiación UV-VIS. Los puntos de muestreo fueron tomados de 0 hasta 400 minutos a intervalos de 10 minutos. En el gráfico se muestran algunos espectros representativos del experimento.

Las bandas a 219 y 270 nm corresponden a la suma de todas las absorbancias de los contaminantes orgánicos disueltos en el agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport, los cuales se están degradando fotocatalíticamente durante el proceso del tratamiento.

La banda situada a 195 nm que corresponde a la absorción de fenol, se observa que decae con el tiempo de irradiación a partir de los 170 minutos,

debido a que el fenol usado en la limpieza y desinfección del equipo de producción se emplea en menor concentración que para el caso del agua residual proveniente de la producción jarabe de ambroxol y el suero oral oraldex.

Se colocó la muestra de agua residual en estudio con 1 g/L de fotocatalizador ZnO y se ajustó a pH ácido, básico y neutro (haciendo un experimento para cada uno de los pHs en estudio para comprobar el efecto del pH sobre la velocidad de reacción). Luego se irradió con luz ultravioleta (UV) a partir de este momento se comenzó a tomar el tiempo de la reacción. En cada intervalo de tiempo se tomaron alícuotas de 2.0 mL de la suspensión y se centrifugó para remover el óxido de zinc. Se tomaron los espectros UV-VIS de cada una de las alícuotas de los diferentes intervalos de tiempo establecidos y se seleccionaron las bandas características de la muestra para seguir la cinética de fotodegradación de los contaminantes en la muestra. Se ajustaron los datos obtenidos de absorbancia y tiempo con modelos matemáticos cinéticos para establecer la ley de velocidad de fotodestrucción de los contaminantes en la muestra.

5.5. Cinética de degradación del agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol a pH= 6.5

En la figura N° 16 se presenta la gráfica de absorbancia vs tiempo de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol a pH= 6.5 sometida a irradiación UV en presencia de ZnO como fotocatalizador, donde se observa un decaimiento en la intensidad de la banda situada a 251 nm la

cual representa las absorciones de los contaminantes disueltos en el agua residual. Este resultado demuestra que los contaminantes se están fotodegradando con el tiempo de irradiación.

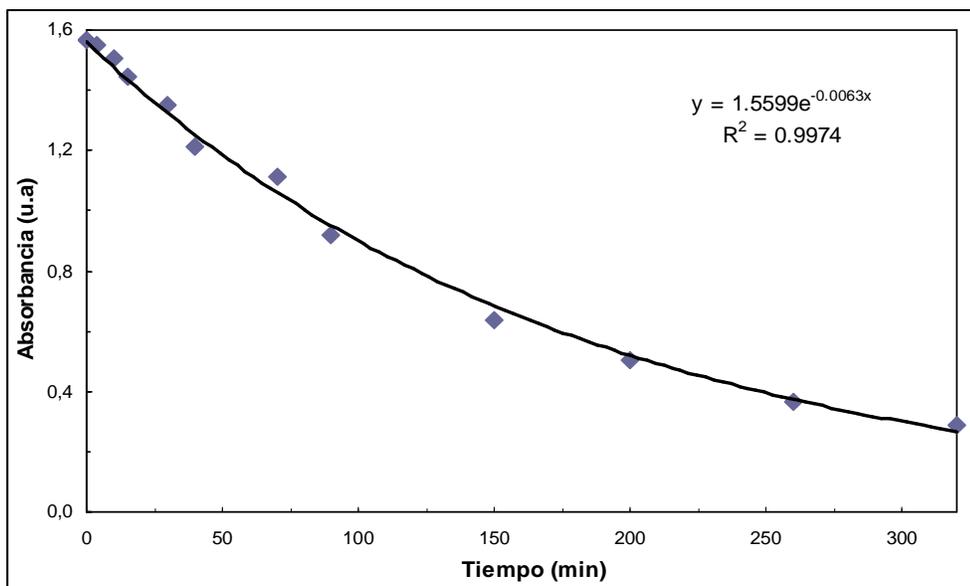


Figura N° 16: Cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 251 nm de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol 12 ppm a pH= 6.5

5.6. Linealidad de la cinética de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol a pH= 6.5

En la figura N° 17 se observa una representación de $\ln\{(A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)\}$ vs t donde se nota una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales. La muestra analizada en este estudio ajustó mejor con el modelo matemático de primer orden de acuerdo al mecanismo de Langmuir-Hinshelwood propuesto en la literatura. (2,16)

$$\ln ((A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)) = kt$$

Donde: A_0 = Absorbancia inicial
 A_∞ = Absorbancia medida a un tiempo infinito
 A_f = Absorbancia final

Se ha corregido la línea base midiendo la absorbancia en el tiempo infinito (A_∞) la cual corresponde a la absorbancia residual que debe sustraerse para corregir el tiempo infinito que no es posible alcanzar en una reacción química. El tiempo infinito se ha tomado como aquel en el cual ya no se observa variación en la absorbancia durante el transcurso de la reacción. La linealidad de los datos experimentales obtenidos demuestran que la degradación fotocatalítica de los contaminantes disueltos ajustan perfectamente con el modelo cinético de primer orden propuesto por Langmuir- Hinshelwood, se encontró una constante de velocidad (k) de 0.0063 min^{-1} a partir de la ecuación anterior y al sustituirla en la ley de velocidad de fotodestrucción de los contaminantes disueltos, se obtiene la expresión matemática:

$$\text{Ln} \left[\frac{[A]_0}{[A]} \right] = (0.0063 \pm 0.0001) \text{ min}^{-1} t \text{ (min)}$$

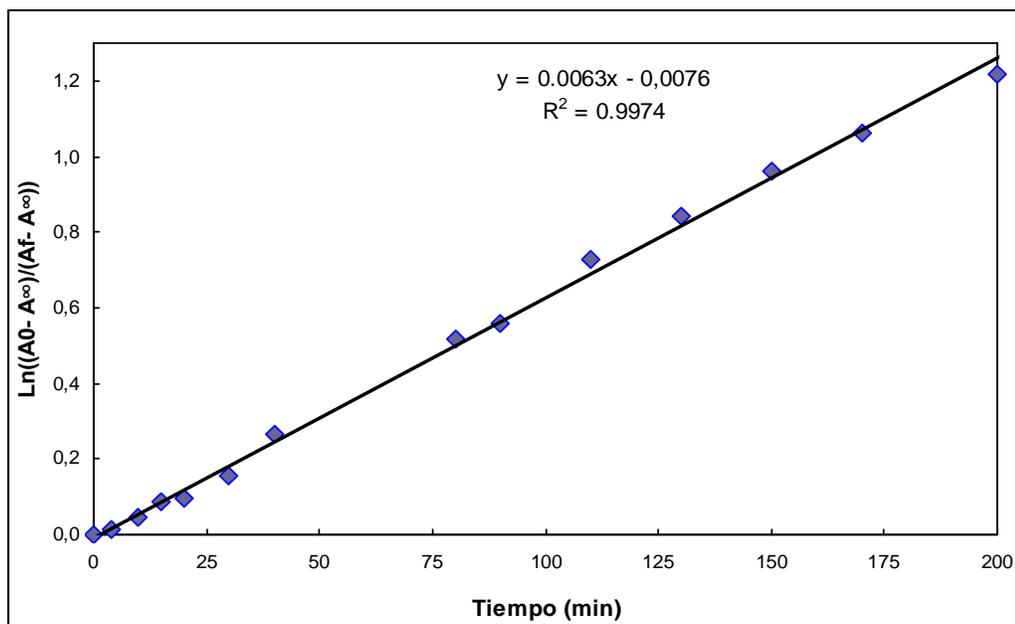


Figura N° 17: Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 251 nm de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol 12 ppm a pH= 6.5

5.7. Cinética de degradación fotocatalítica de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH= 6

En la figura N° 18 se presenta la gráfica de absorbancia vs tiempo de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH= 6.0 sometida a irradiación UV-VIS en presencia de ZnO como fotocatalizador, donde se observa un decaimiento en la intensidad de la banda situada a 234 nm la cual representa las absorciones de los contaminantes disueltos en el agua residual. Este resultado demuestra que los contaminantes se están fotodegradando con el tiempo de irradiación.

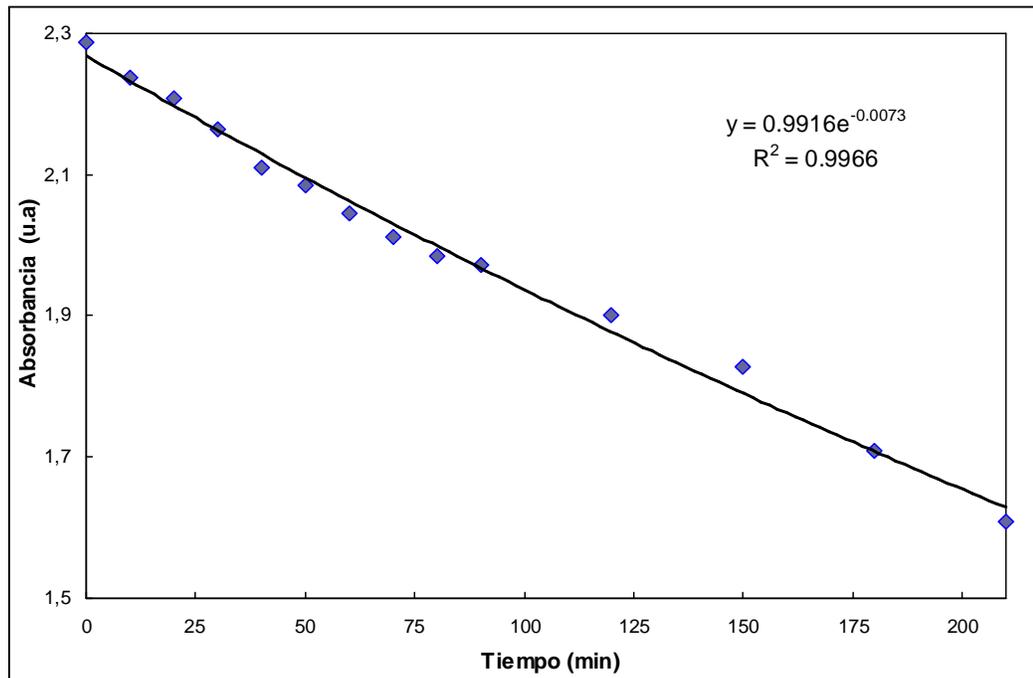


Figura N° 18: Cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 234 nm de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH= 6

5.8. Linealidad de la cinética del agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex pH= 6

En la figura N° 19 se observa una representación de $\ln\{(A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)\}$ vs t de donde se nota una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales. Para la muestra analizada en este caso los datos experimentales ajustaron con una correlación bien alta con el modelo matemático de primer orden de acuerdo al mecanismo de Langmuir-Hinshelwood descrito en la sección anterior.

$$\ln ((A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)) = kt$$

Al encontrar la constante de velocidad (k) de 0.0073 min^{-1} a partir de la ecuación anterior y al sustituirla en la ley de velocidad de fotodestrucción de los contaminantes disueltos, se obtiene la siguiente expresión matemática:

$$\ln \left[\frac{[A]_0}{[A]} \right] = (0.0073 \pm 0.0001) \text{ min}^{-1} t \text{ (min)}$$

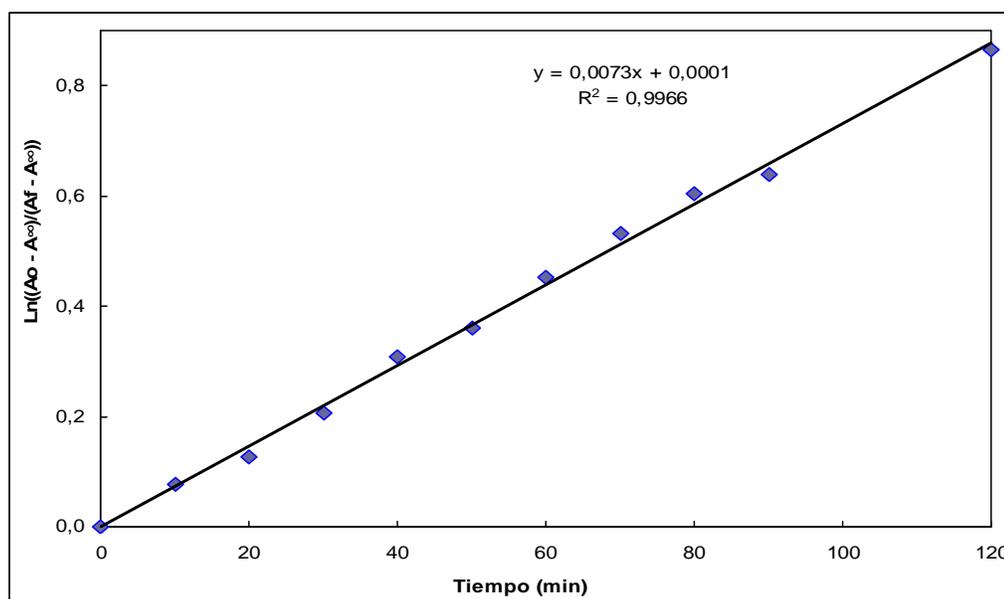


Figura N° 19: Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda a 234 nm de agua residual proveniente de la producción de suero oral oraldex a pH= 6.0

5.9. Cinética de degradación del agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport a pH= 6

En la figura N° 20 se presenta la gráfica de absorbancia vs tiempo de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport a pH 6 sometida a irradiación UV-VIS en presencia de ZnO como fotocatalizador, donde se observa un decaimiento en la intensidad de la banda situada a una longitud de onda de 218 nm la cual representa las absorciones de los contaminantes disueltos en el agua residual. Este resultado demuestra que los contaminantes se están fotodegradando con el tiempo de irradiación.

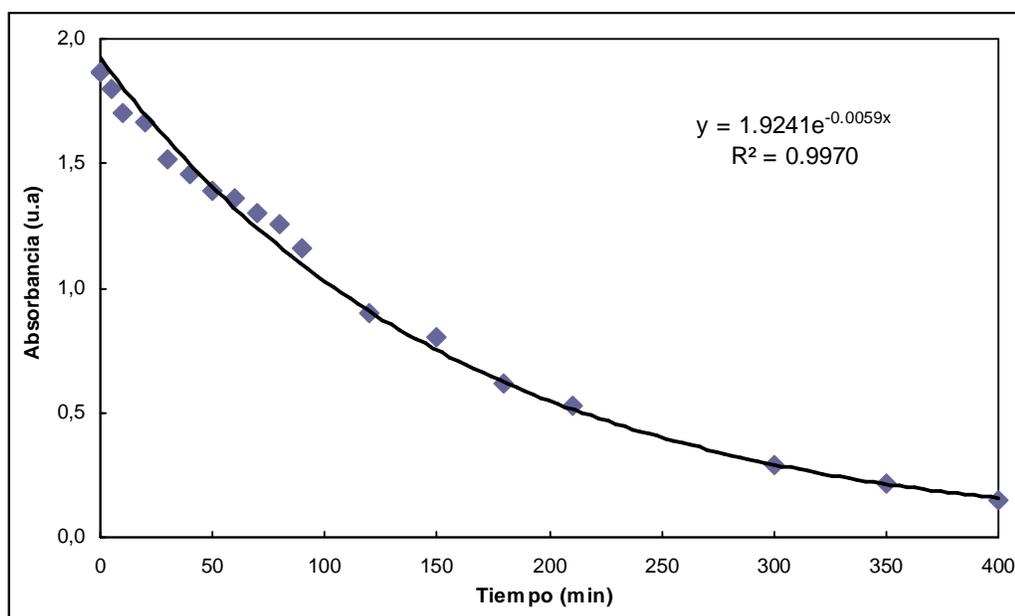


Figura N° 20: Cinética de degradación fotocatalítica de la banda a 218 nm agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport a pH = 6

5.10. Linealidad de la cinética de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport a pH de 6

En la figura N° 21 se observa una representación de $\text{Ln}\{(A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)\}$ vs t de donde se nota una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales.

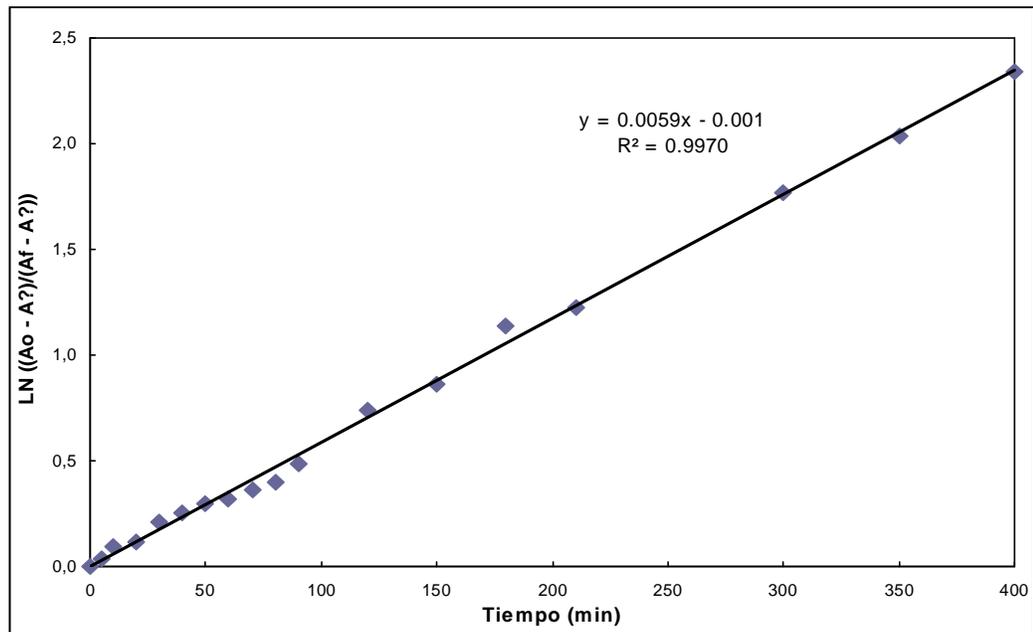


Figura N° 21: Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 218 nm del agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport a pH = 6

Para la muestra analizada en este caso los datos experimentales ajustaron con un coeficiente de correlación alto con el modelo cinético de primer orden según el mecanismo de Langmuir- Hinshelwood tal como fue descrito anteriormente:

$$\text{Ln} ((A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)) = kt$$

Se encontró una constante de velocidad (k) de 0.0059 min^{-1} a partir de la ecuación anterior y al sustituirla en la ley de velocidad de fotodestrucción de los contaminantes disueltos, se obtiene la expresión matemática:

$$\text{Ln} \left[\frac{[A]_0}{[A]} \right] = (0.00590 \pm 0.00004) \text{ min}^{-1} t \text{ (min)}$$

5.11. Efecto del pH sobre la velocidad de reacciones fotocatalíticas

Los estudios muestran que el pH tiene un notable efecto en la degradación de los compuestos orgánicos, mediante el ajuste de pH ya sea ácido, básico o neutro puede variarse la velocidad de reacción aumentándola o disminuyéndola porque se modifica la carga de la capa de solvatación del fotocatalizador.

Al encontrar un pH que aumente la velocidad de reacción implica un mayor porcentaje de degradación de los contaminantes disueltos.

Las condiciones a pH ácido favorecieron la velocidad de reacción por el aumento de la carga positiva electrostática superficial de las partículas del fotocatalizador que favorece la atracción y posterior la oxidación de los contaminantes orgánicos disueltos, los cuales obviamente poseen carga negativa. De esta manera mejora la actividad del fotocatalizador, disminuye el tiempo de irradiación y la velocidad de degradación fotocatalítica aumenta considerablemente. (Ver cuadro N° 1)

Cuadro No. 1: Resultados del tratamiento fotocatalítico de las muestras de aguas residuales en estudio y fenol 12 ppm

Muestra de agua residual	pH	Constante de velocidad (min^{-1})	Banda degradada (λ , nm)	Tiempo degradación de la banda (min)
Jarabe de ambroxol	6.5	0.0063±0.0001	251	170
	7.0	0.0071±0.0001	251	210
	10.0	0.0070±0.0004	251	390
Crema fría artrisport	6.0	0.00590±0.00004	219	210
	7.0	0.0068±0.0011	219	590
	10.0	0.0060±0.0001	219	180
Suero oral oraldex	6.0	0.0073±0.0001	234	270
	7.0	0.0065±0.0004	234	120
	10.0	0.0054±0.0001	234	140
Fenol	6.0	0.0074±0.0002	271	390
	7.0	0.0064±0.0005	271	390
	10.0	0.00530±0.00008	271	300

Las muestras de aguas residuales en estudio fueron tratadas fotocatalíticamente a diferentes pHs de 6.0, 7.0 y 10 con la finalidad de encontrar a que pH la degradación fotocatalítica de los contaminantes presentes en las muestras ocurría más rápido y así determinar el pH óptimo para el tratamiento de las muestras. En el cuadro No. 2 se presentan las

constantes de velocidad de las muestras tratadas fotocatalíticamente a diferentes pHs:⁽¹⁶⁾

Cuadro N° 2: Constantes de velocidad de las muestras a pHs diferentes

<i>pH de la muestra</i>	Constante de velocidad k (min⁻¹)			
	<i>Jarabe de ambroxol *</i>	<i>Suero oral Oraldex</i>	<i>Crema fría artrispport</i>	Fenol (12 ppm)
pH = 6.0	0.0063±0.0001	0.0073±0.0001	0.00590±0.00004	0.0074±0.0002
pH = 7.0	0.0071±0.0001	0.0065±0.0004	0.0068±0.0011	0.0064±0.0005
pH = 10	0.0070±0.0004	0.0054±0.0001	0.0060±0.0001	0.00530±0.00008

*El jarabe de ambroxol fue ajustado a pH = 6.5

El pH óptimo encontrado para la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos disueltos en las muestras en estudio fue pH ácido. En la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol la velocidad de reacción se vuelve tres veces mas rápida a pH 6.5 que a pH 10, en el caso de las muestras de aguas residuales provenientes de la producción de suero oral oraldex y crema fría artrispport la velocidad se vuelve dos veces mas rápida a pH 6 que a pH 10.

5.12. Degradación fotocatalítica del fenol 12 ppm

Se determinó por espectro-cinética UV-VIS que el contaminante disuelto en el agua residual que más tiempo necesito para su fotodegradación fué el fenol.

En la figura N° 22 se muestra el espectro UV-VIS de la degradación fotocatalítica de fenol 12 ppm a pH 6 se observa la disminución de las bandas de absorción características de fenol situadas a las longitudes de

onda de 210 nm y 270 nm. Se observa además que la banda a 270 nm decae completamente a los 390 minutos de irradiación mientras que la banda situada a 210 nm aun persiste. Este comportamiento se puede explicar en términos de la sensibilidad de las bandas la cual se manifiesta en los valores de los coeficientes de absorptividad molar respectivos. (Ver anexo N° 9)

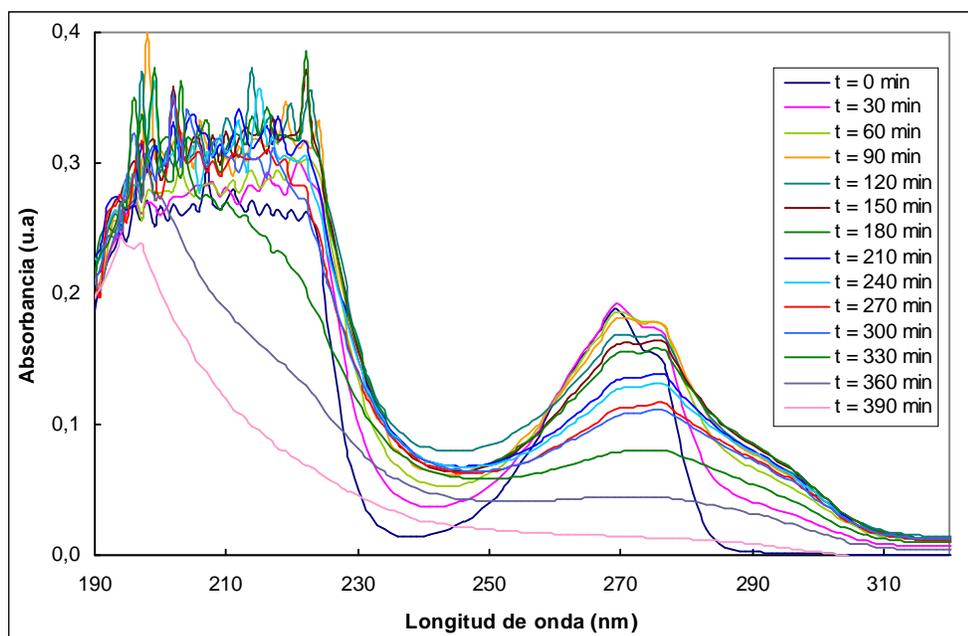


Figura N° 22: Degradación fotocatalítica de fenol 12 ppm a pH= 6.0 en presencia de ZnO y radiación UV. Los puntos de muestreo fueron tomados de 0 hasta 390 minutos a intervalos de 10 minutos. En el gráfico se muestran algunos espectros representativos del experimento.

En la figura N° 22 se puede observar el decaimiento de las bandas de absorción de 210 nm y 270 nm con el tiempo de irradiación demuestran que el fenol se esta fotodegradando, puesto que en la solución no existe otra sustancia química aparte del fenol.

Comparando los tiempos de decaimiento observados para las diferentes muestras en estudio con el tiempo de decaimiento de la banda de 270 nm del fenol el cual es mucho mayor, se puede sospechar que es el fenol el que limita la velocidad de fotodestrucción de los contaminantes disueltos en los tres tipos de muestras en estudio. Razón por la cual se hace necesario hacer un estudio cinético solamente para el fenol y establecer la ley de velocidad de su fotodestrucción para que sirva de modelo cinético para las muestras en estudio.⁽⁶⁾

5.12.1. Cinética de degradación de la banda a 270 nm de fenol 12 ppm a pH= 6

Se eligió la banda de absorción a 270 nm para seguir la cinética de fotodegradación del fenol porque la probabilidad de contaminación por las bandas de absorción ultravioleta de los iones Zn^{+2} y OH^- es mínima debido a las posiciones en donde estas se presentan.

En la figura N° 23 se presenta la gráfica de absorbancia vrs tiempo de agua residual de fenol 12 ppm a pH 6.0 sometida a irradiación UV en presencia de ZnO como fotocatalizador, donde se observa un decaimiento en la intensidad de la banda situada a una longitud de onda de 270 nm la cual representa la absorciones fenol (de la banda del anillo aromático).

Este resultado demuestra que el fenol se está fotodegradando con el tiempo de irradiación. (Ver anexo N° 8.)

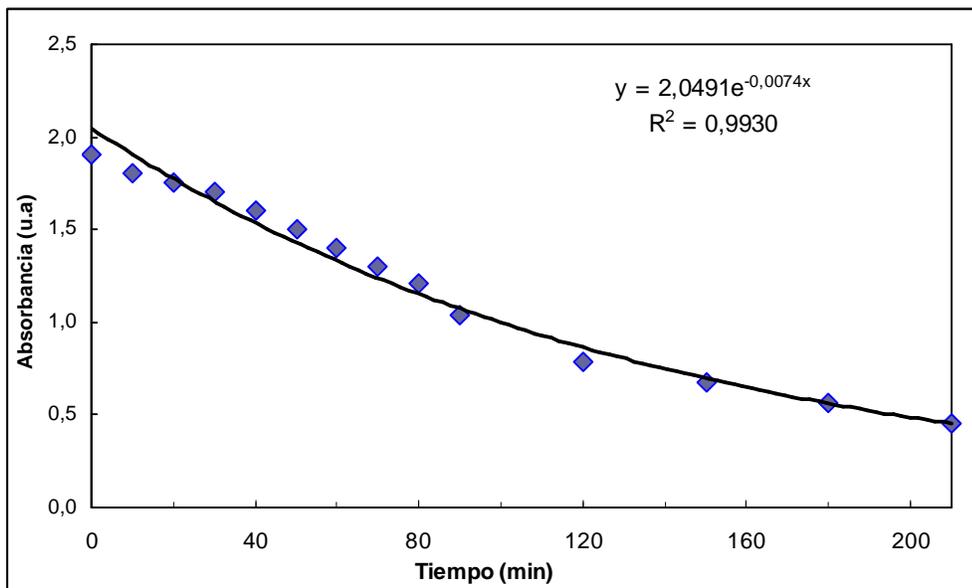


Figura N° 23: Cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 270 nm de fenol 12 ppm a pH= 6

5.12.2. Linealidad de la cinética de la solución de fenol 12 ppm a pH= 6

En la figura N° 24 se observa una representación de $\ln\{(A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)\}$ vs t de donde se nota una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales. Para la solución de fenol 12 ppm los datos experimentales ajustaron con un coeficiente de correlación alto con el modelo cinético de primer orden según el mecanismo de Langmuir- Hinshelwood tal como fue descrito anteriormente:

$$\ln ((A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty)) = kt$$

Se encontró una constante de velocidad (k) de 0.0074 min^{-1} a partir de la ecuación anterior y al sustituirla en la ley de velocidad de fotodestrucción de los contaminantes disueltos, se obtiene la expresión matemática:

$$\ln \left[\frac{[A]_t}{[A]} \right] = (0.0074 \pm 0.0002) \text{ min}^{-1} t \text{ (min)}$$

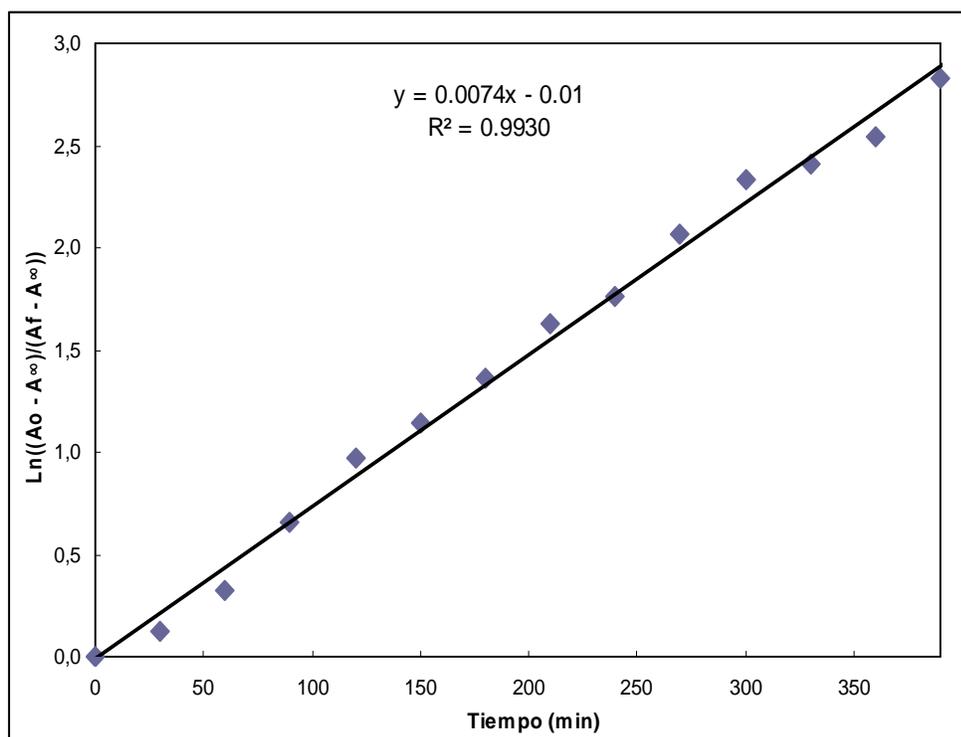


Figura N° 24: Linealidad de la cinética de degradación fotocatalítica de la banda de 270 nm de fenol 12 ppm a pH= 6

5.12.3. Efecto del pH sobre la degradación fotocatalítica de fenol 12 ppm

Se ha encontrado en la literatura que se logra una mejor degradación de los compuestos fenólicos bajo condiciones ácidas, específicamente, en valores de pH que se encuentren cercanos y por debajo del punto isoelectrico del fotocatalizador ZnO.

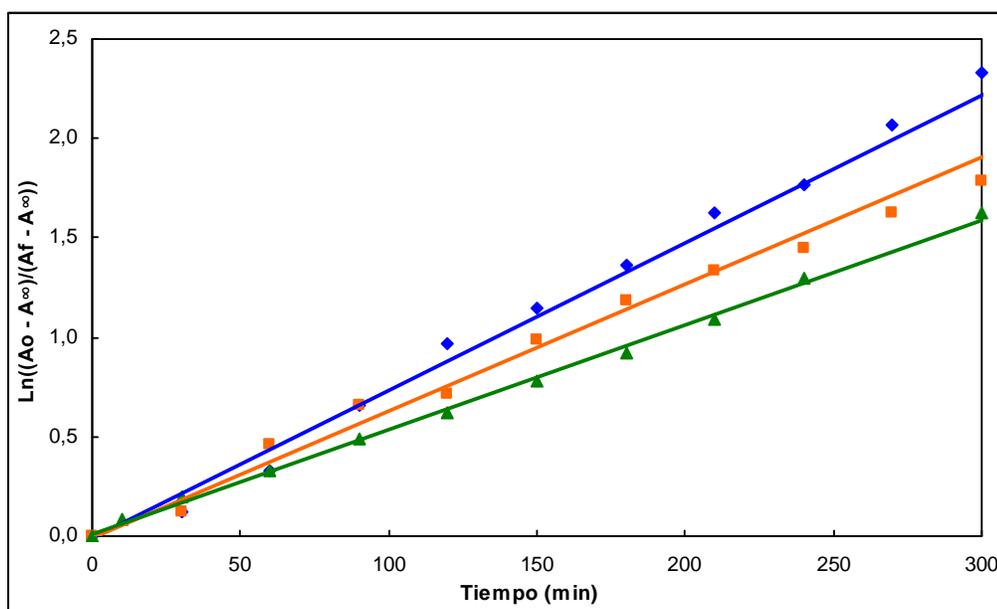


Figura N° 25: Efecto del pH sobre la velocidad de reacción del fenol 12 ppm a diferentes pHs: (♦) pH = 6.0, (■) pH = 7.0 y (▲) pH = 10.

En la figura N° 25 se muestra el efecto del pH sobre la velocidad de degradación del fenol diferentes pHs, con el objeto de determinar a que pH se obtuvo una mayor velocidad de reacción. Estableciendo que el pH óptimo de la degradación fotocatalítica de fenol con ZnO como catalizador fue a pH= 6, debido a que a un pH menor el ZnO se disuelve en el medio y a un pH mayor la fotocatalisis es muy lenta. En medio ácido la destrucción de fenol en el agua residual presenta una constante de velocidad mayor; lo que

significa que la reacción fotocatalítica de fenol fue más rápida, respecto a los otros pHs en estudio. (Ver cuadro No 2).

Además en la figura N° 25 se observa el efecto de pH sobre la velocidad de degradación de fenol a 12 ppm, estableciendo que a (♦) pH de 6.0 la degradación fotocatalítica de fenol ocurre en un tiempo de 390 minutos, esto se debe a que a pH de 6.0 la molécula de fenol por resonancia magnética en el anillo aromático queda cargado positivo atrayendo los radicales oxidrilos de carga negativa, ocurriendo así la degradación fotocatalítica de fenol. También se observa en esta figura los otros pHs en estudio (■) pH = 7.0 y (▲) pH = 10 en los que la velocidad de reacción es mas lenta. (Ver cuadro No. 2). (16)

5.13. Determinación del tiempo de residencia de irradiación para las aguas residuales tomando como modelo el fenol.

Se utilizó la Ley de Beer para calcular la concentración Molar (M) de fenol durante la degradación fotocatalítica.

Formula de Ley de Beer:

$$A = \varepsilon b C$$

Despejando la concentración:

$$C = \frac{A}{\varepsilon b}$$

Donde:

A = Absorbancia

ϵ = Epsilon de fenol a longitud de onda de 270 nm = $1450 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

b = Espesor de la celda: 1 cm.

C = Concentración de la muestra (Molar)

Luego se convirtió la concentración molar (M) a partes por millón (ppm) ó mg/L, (ver anexo N° 13) para comparar los resultados con el límite permitido por la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales los cuales se encuentra en unidades de partes por millón (ppm). Se observa la disminución de la concentración de fenol desde 12.38 ppm hasta 0.5 ppm, cumpliendo el valor máximo permisible de fenol en la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales.

Se tomó como base el fenol para estimar el tiempo de residencia total de acuerdo con la ley cinética encontrada para el agua residual en estudio, puesto que es el que limita la velocidad total de fotodegradación de los demás contaminantes presentes en las muestras de agua residual.

Para la determinación del tiempo de residencia, se empleó la siguiente fórmula, la cual establece el tiempo necesario para lograr la completa fotodegradación del fenol hasta la concentración máxima permisible según la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales.

Fórmula para determinar el tiempo de residencia

$$t = \left[\frac{\text{Ln} \left[\frac{C_0}{C} \right]}{k} \right]$$

Donde:

t = Tiempo de residencia

C_o = Concentración inicial = 12.38 ppm

C = Concentración final (máximo valor permisible de fenol 0.5 ppm según NSO 13.49.01:06)

k = Constante de velocidad de reacción = (0.0074 min⁻¹)

Sustituyendo

$$t = \left[\frac{\text{Ln} \left[\frac{C_0}{C} \right]}{k} \right]$$

$$t = \left[\frac{\text{Ln} \left[\frac{12.38 \text{ ppm}}{0.5 \text{ ppm}} \right]}{0.0074 \text{ min}^{-1}} \right]$$

$$t = (433.68 \pm 30.43^*) \text{ minutos}$$

$$t = (43 \pm 3^*) \times 10^1 \text{ min}$$

$$\mathbf{t = 7.2 \text{ horas}}$$

* Incertidumbre del tiempo de residencia (Ver anexo No. 14)

Dando como resultado 7 horas 20 minutos el tiempo necesario para lograr la fotodegradación completa del fenol hasta el valor máximo permisible por la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales.

El tiempo de residencia de fenol, por ser el contaminante que más tiempo tardó en fotodegradarse, se tomó como parámetro para establecer que a 7 horas 20 minutos todos los demás componentes de las muestras de agua residual de producción de suero oral oraldex, jarabe de ambroxol y crema fría artrisport, se ha degradado completamente.

5.14. Análisis de las muestras de agua residual en estudio según NSO

13.49.01:06 aplicada para aguas residuales ⁽¹⁰⁾.

Se realizaron análisis físico-químicos y microbiológicos de las muestras de las aguas residuales provenientes de las diferentes líneas de producción en estudio y se compararon con la norma de calidad de aguas residuales, NSO 13.49.01:06 comprobando la efectividad del tratamiento fotocatalítico, puesto que las muestras tratadas cumplen con los parámetros de calidad fisicoquímicos y microbiológicos establecidos para aguas residuales de tipo especial para la industria farmacéutica. ⁽¹⁰⁾

A continuación se presentan los resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos de las muestras de agua residual de las líneas de producción de líquidos y semisólidos seleccionadas en esta investigación.

5.14.1. Análisis de los parámetros críticos realizados a la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol. (10)

Cuadro N° 3: Análisis de parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Resultado antes del tratamiento Fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
JARABE DE AMBROXOL	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS			
	Coliformes totales	10,000 NMP/100ml	28,000 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	Coliformes termotolerantes	2000 NMP/100ml	3400 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	<i>Escherichia coli</i>	2000 NMP/100ml	3400 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	ANALISIS FISICO QUIMICOS			
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	100 mg/L	356 mg/L	55 mg/L
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	300 mg/L	648 mg/L	175 mg/L
	Sólidos sedimentables	15 mL/L	95 mL/L	2 mL/L
	Aceites y grasas	30 mg/L	22 mg/L	17 mg/L

En el cuadro N° 3 se presentan los análisis físico-químicos y microbiológicos de los parámetros para verter aguas residuales de tipo especial a un cuerpo receptor provenientes del lavado de la línea de fabricación de productos farmacéuticos y medicamentos, realizados a la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

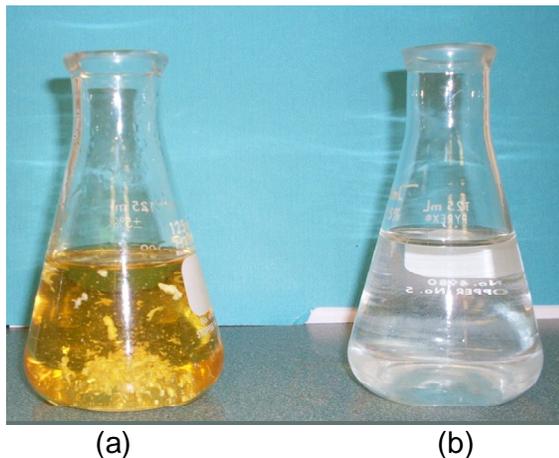


Figura N° 26: Comparación de las muestras de agua residual de producción de jarabe de ambroxol, (a) Antes del tratamiento fotocatalítico;(b) Después del tratamiento fotocatalítico.

En la figura N° 26 se comparan las diferencias significativas que existen en la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol antes y después del tratamiento fotocatalítico, demostrando así la efectividad del método en la desinfección y descontaminación del agua de desecho.

A. Análisis de resultados antes del tratamiento fotocatalítico.

- Descripción del agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol

El agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, antes del tratamiento fotocatalítico comprendía las siguientes características entre las cuales están:

- Color: ámbar oscuro producido por la composición del colorante del jarabe de ambroxol y la solución de fenol al 4% la cual poseía un color ámbar más claro debido a su estado de oxidación.

- Olor: Característico a fenol, debido a la elevada concentración en que se encontraba en la muestra y un olor en menor percepción al jarabe de ambroxol.
- Aspectos: Contenía sólidos suspendidos y sedimentables de gran tamaño los cuales se observaban a simple vista, estos sólidos generaban una visión en el agua residual de un aspecto turbio y de alto grado de contaminación, demostrando que las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción se encontraban altamente contaminadas. (Ver figura N° 26)

- Análisis de resultados microbiológicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Se observa que los resultados de los análisis microbiológicos realizados antes del tratamiento fotocatalítico se encuentran con valores que sobrepasan el doble de los límites máximos permisibles por la normativa, donde los parámetros analizados como por ejemplo:

- Los coliformes totales: se encuentran en un porcentaje de 280% arriba del límite establecido por la norma.
- La determinación de coliformes termotolerantes y *Escherichia coli*: se encuentran cada una a 170% por encima del límite establecido por la norma.

Este alto grado de contaminación posiblemente se deba a la presencia de microorganismos depositados en las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción, porque estas permanecen la mayor parte del tiempo húmedas lo cual es esencial para el crecimiento de microorganismos.

La acción de la solución de fenol al 4% utilizado como un desinfectante es efectiva en el área de la maquinaria de producción, pero no en el área de las tuberías de drenaje donde el fenol pasa rápidamente y no logra un tiempo de contacto suficiente para eliminar los microorganismos.

-. Análisis de resultados físico-químicos antes del tratamiento fotocatalítico: ⁽¹⁰⁾

Los resultados de los análisis físico-químicos realizados antes del tratamiento fotocatalítico sobre pasa los límites máximos permisibles por la norma, entre los que están:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) el cual se encuentra en un porcentaje de 356% arriba del límite máximo de la norma, a pesar que el valor máximo permisible establecido por la norma es elevado (100 mg/L) comparado con el límite máximo de otras normativas como las normas oficiales venezolanas para la calidad del agua que es de 60 mg/L. ⁽¹⁵⁾

El límite para el DBO_5 de la norma para aguas residuales de El Salvador permite que la muestra en estudio contenga cierta cantidad de materia orgánica biodegradable en mayor magnitud que la normativa de Venezuela.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO) se encuentra en un porcentaje de 216% arriba del límite máximo de la norma. El límite establecido por la norma para este parámetro es elevado debido a la dificultad de la degradación de la materia orgánica no biodegradable.

- Los sólidos sedimentables se encuentran en un porcentaje de 633% por encima de la norma, estos sólidos se puede observar a simple vista en la muestra por ello el aspecto físico de la misma. En los métodos convencionales de tratamiento utilizados se necesitaría de filtros a presión de microporo lo cual dificulta en términos de costos y proceso.
- El único parámetro químico que cumplió con la norma es el análisis de aceites y grasas, el cual se encuentra por debajo del valor máximo permisible, debido a que la muestra de agua residual analizada proveniente de la fabricación del jarabe de Ambroxol no contenía en su formulación materias primas que contengan grasas.

Se realizó una investigación del proceso de limpieza de la maquinaria empleada para la fabricación del producto; en la cual se emplean detergentes con el fin de remover el jarabe viscoso de los tanques de producción. El resultado de emplear detergente en este proceso de limpieza se refleja en la presencia de aceites y grasas en el resultado del análisis.

El agua residual proveniente del drenaje de la maquinaria de producción de jarabe de ambroxol según el grado de contaminación que presentó en los parámetros microbiológicos y químicos contiene el doble en magnitud de materia orgánica no biodegradable, más del triple de materia orgánica biodegradable y seis veces más de sólidos sedimentables de lo que exige la norma.

El peligro de descargar este tipo de agua residual con esta excesiva carga de contaminación a las aguas superficiales y a las aguas subterráneas es la materia orgánica no biodegradable debido a que puede permanecer por largo tiempo en los cuerpos receptores y en las aguas subterráneas. Este tipo de contaminantes no se puede detectar a simple vista, y por ello puede ocasionar una alta contaminación a todos los seres vivientes. ⁽¹⁷⁾

B. Análisis de resultados después del tratamiento fotocatalítico.

- Descripción del agua residual tratada fotocatalíticamente:

El agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción de jarabe de ambroxol después del tratamiento fotocatalítico presentó las siguientes características:

- Color: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual fue incolora, debido a que se eliminó el color producido por los restos del jarabe de Ambroxol que poseía el agua residual y el color producido por el fenol principalmente.
- Olor: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual presentó un olor agradable, a limpio que probablemente el responsable sea un compuesto clorado, por su similitud con el olor a la lejía. Verificando que el olor producido por el fenol el cual se encontraba en mayor proporción ya no era percibido.

- Aspecto: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual presentó un aspecto incoloro y libre de partículas suspendidas. (ver Figura N° 26)

- Análisis de resultados microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico reflejan que se logró la total eliminación de los coliformes totales, termotolerantes y la *Escherichia coli*, asegurando por medio de este tratamiento que se puede obtener la ausencia de microorganismos en el agua residual cumpliendo con la normativa en un porcentaje del 100% de eliminación de microorganismos. (25)

Los resultados obtenidos son mejores que el límite máximo permisible por la norma para agua residuales, esto comprueba que el método fotocatalítico es efectivo para la desinfección de las aguas residuales y que garantiza que la composición del agua residual sometida a este tratamiento se encuentra libre de contaminantes microbiológicos.

- Análisis de resultados físico-químicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis físico-químicos después de la aplicación del tratamiento fotocatalítico no solo cumplen con los límites permitidos por la norma NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales, sino que se logra una disminución de cada parámetro con un valor mucho menor al límite máximo permisible establecido por la norma, entre los cuales están:

- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5): disminuyó en un porcentaje de 85% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, este resultado además representa el 55% menos al valor del límite máximo permisible establecido por la norma.

La disminución de este parámetro se logró por la oxidación de la materia orgánica, oxidación producida por los radicales oxidrilo (OH^\bullet) y por los hoyos generados por la excitación de los electrones que pasan de la banda de valencia hacia la banda de conducción de las partículas del fotocatalizador (ZnO). ⁽¹⁴⁾

- La Demanda Química de Oxígeno (DQO): disminuyó en un porcentaje de 73% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando disminuir en un 40% menos al valor límite máximo permisible por la norma. La disminución de este parámetro se debió a la fotooxidación de la mayoría de la materia orgánica no biodegradable, producido por los radicales oxidrilo (OH^\bullet) y por los hoyos de las partículas del fotocatalizador (ZnO).
- Los Sólidos Sedimentables: disminuyó en un porcentaje de 98% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando disminuir en un 87% menos que el máximo valor permisible por la norma.

El resultado de la disminución de este parámetro es importante debido a que se logró la eliminación de la mayoría de sólidos suspendidos y sedimentables de la muestra en estudio generado por dos mecanismos distintos: reacciones de oxidación de la fotocatalisis sobre los sólidos

suspendidos y posiblemente por el efecto de adsorción de los sólidos sobre las partículas de óxido de zinc. (14)

La disminución en los diferentes parámetros analizados muestra que el estudio fué principalmente debido a la fotooxidación de la reacción fotocatalítica, no se empleó la adición de ningún químico que generará ó potencializara la oxidación de la materia orgánica existente en la muestra de agua residual. La fotocatalisis es un tratamiento que no utiliza ningún aditivo químico más que el fotocatalizador el cual se puede remover del agua tratada y puede volver a reutilizarse.

Analizados los resultados de los parámetros microbiológicos y químicos y comparando el análisis final del agua residual de producción antes y después del tratamiento fotocatalítico se comprueba la efectividad del tratamiento, asegurando la posibilidad de descargar un afluente libre de contaminación al cuerpo receptor, contribuyendo en gran medida a la conservación del medio ambiente. (16)

En el cuadro N° 4 se presenta en forma resumida los porcentajes obtenidos de los parámetros analizados, comparado según la NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales. Observando el grado de contaminación del agua residual control proveniente del lavado de la línea de producción de jarabe de ambroxol.

Al igual que los porcentajes de disminución del grado de contaminación del agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico, comparado con la muestra control y la normativa NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales

Cuadro N° 4: Análisis porcentual de los parámetros críticos para el agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
JARABE DE AMBROXOL	Coliformes totales	170%	0%	0%
	Coliformes termotolerantes	280%	0%	0%
	E. Coli	280%	0%	0%
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	356%	85%	55%
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	216%	73%	40%
	Sólidos sedimentables	633%	98%	0%
	Aceites y grasas	No paso el límite de la Norma	23%	43%

5.14.2 Determinación de fenol para el agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol antes y después del tratamiento fotocatalítico.

- A. Análisis de resultado de la determinación de fenol antes del tratamiento fotocatalítico:

La determinación de fenol antes del tratamiento fotocatalítico se encuentra en un porcentaje de 80,000%, el cual sobre pasa al máximo valor permisible por la norma. (Ver cuadro N° 5).

Cuadro N° 5. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
JARABE DE AMBROXOL	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	0.5 mg/L	400.13 mg/L	0.45 mg/L

La solución de limpieza que se emplea como medio de desinfección de la maquinaria de fabricación se encuentra a una concentración elevada, esta excesiva cantidad de fenol en el agua residual puede causar problemas graves de contaminación de las aguas superficiales y en aguas subterráneas.

A este problema de contaminación hídrica se le debe de poner una atención inmediata y primordial debido al daño que se le está produciendo a los ecosistemas. (17)

B. Análisis de resultado de la determinación de fenol después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis para la determinación de fenol después de realizado el tratamiento fotocatalítico se encuentra con un valor menor al máximo permisible por la norma (NSO 13.49.01:06) disminuyendo en un porcentaje del 99.91% de fenol con respecto a la muestra no tratada, logrando obtener un porcentaje del 10% menos al valor máximo permisible establecido por la norma. (ver cuadro No. 5). (2,6,15,16)

Este resultado de la disminución de fenol fué generado por la oxidación producida por los radicales oxidrilos en la reacción fotocatalítica sobre la materia orgánica. La degradación del fenol fué lenta debido a la resonancia magnética que posee el anillo aromático cuya carga es negativa al igual que la carga de los radicales oxidrilos lo cual no favorece la atracción de los radicales hacia la molécula del fenol y por ello la reacción se acidificó para favorecer la atracción y generar la fotodegradación del fenol.

Por ser el contaminante de más difícil degradación se estableció como modelo para el cálculo de la estimación del tiempo de residencia para la degradación fotocatalítica utilizando como valor mínimo de concentración de fenol en el agua residual el valor máximo permisible por la norma para aguas residuales.

Determinado el tiempo de residencia ó el tiempo necesario para la degradación del fenol que fué de 7.23 horas se logró disminuir este parámetro desde un porcentaje de 80,000% arriba del límite de la normativa hasta un 10% menos al límite máximo permisible por la norma.

El cumplimiento de este parámetro complementario establecido en la norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales, comprueba que la fotocatalisis es un tratamiento efectivo para la eliminación de fenol en el agua.

Cuadro N° 6. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
JARABE DE AMBROXOL	ANALISIS FISICO-QUIMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	80,000%	99.91%	10%

En el cuadro N° 6 se resume el porcentaje de contaminación que posee la muestra de agua residual control proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, comparada con la NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales.

Al igual que el porcentaje de disminución de la muestra de agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico, comparada con la muestra de agua residual control y con la norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales.

5.14.3. Análisis de los parámetros críticos realizados a la muestra de agua residual proveniente de la producción de suero oral Oral dex.

Cuadro N° 7: Análisis de parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
SUERO ORAL ORALDEX	ANALISIS MICROBIOLÓGICOS			
	Coliformes totales	10,000 NMP/100ml	1,600,000 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	Coliformes termotolerantes	2000 NMP/100ml	28,000 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	<i>Escherichia coli</i>	2000 NMP/100ml	28,000 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	ANALISIS FISICO QUIMICOS			
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	100 mg/L	285 mg/L	85 mg/L
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	300 mg/L	455 mg/L	211 mg/L
	Sólidos sedimentables	15 mL/L	45 mL/L	5 mL/L
	Aceites y grasas	30 mg/L	25 mg/L	15 mg/L

En el cuadro N° 7 se presentan los análisis microbiológicos y químicos de los parámetros para verter aguas residuales de tipo especial a un cuerpo receptor provenientes de la fabricación de productos farmacéuticos y medicamentos, realizados a la muestra de agua residual de producción de suero oral oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico

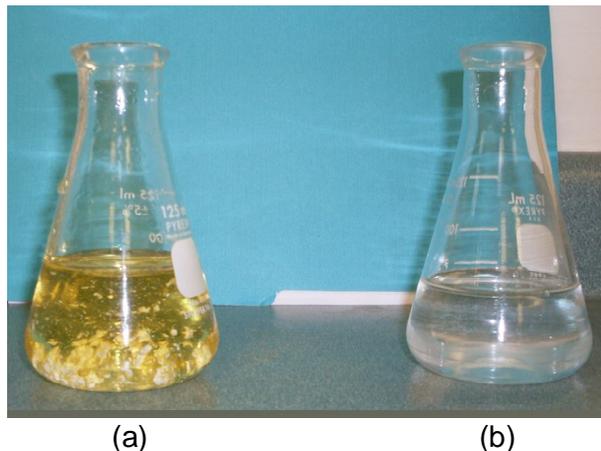


Figura N° 27: Comparación de las muestras de agua residual de producción de suero oral Oraldex, (a) Antes del tratamiento fotocatalítico;(b) Después del tratamiento fotocatalítico

En la figura N° 27 se comparan las diferencias significativas que existen en la muestra de agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico, demostrando así la efectividad del método en la desinfección y descontaminación del agua de desecho.

A. Análisis de resultados antes del tratamiento fotocatalítico.

-. Descripción del agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de suero oral Oraldex:

El agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción de suero oral oraldex, antes del tratamiento fotocatalítico poseía las siguientes características entre las cuales están:

- Color: Ámbar claro, producido por la composición del suero oral y la solución de fenol al 4% la cual poseía un color ámbar más claro debido al estado de oxidación.

- Olor: Característico a fenol, debido a la elevada concentración que poseía la muestra de este contaminante.
- Aspectos: Contenía sólidos suspendidos de menor tamaño, aun así la cantidad de sólidos sedimentables era elevada los cuales se observan a simple vista, demostrando que las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción se encuentran contaminadas. (Ver figura N° 27)

Análisis de resultados microbiológicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Se observa que los resultados de los análisis microbiológicos realizados antes del tratamiento fotocatalítico se encuentran con un valor que sobrepasa a los límites máximos permisibles por la normativa, entre los cuales están:

- Los Coliformes totales se encuentran en un porcentaje de 160,000% arriba del valor límite establecido por la norma, este resultado es elevado y genera una visión del grado de contaminación del agua residual.
- La determinación de Coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* se encuentran cada uno en un porcentaje de 1,400% arriba del límite establecido por la norma.

Este alto grado de contaminación fue posible debido a la presencia de microorganismos depositados en las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción ya que estas permanecen la mayor parte del tiempo húmedas lo cual es esencial para el crecimiento de microorganismos.

La acción de la solución de fenol al 4% utilizado como un desinfectante es efectiva en el área de la maquinaria de producción, pero no en el área de las tuberías de drenaje donde el fenol pasa rápidamente no logrando un tiempo de contacto suficiente para eliminar a los microorganismos.

Análisis de resultados físico-químicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis físico-químicos realizados antes del tratamiento fotocatalítico sobre pasa de forma excesiva los límites máximos permisibles por la norma, entre los que están:

- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) el cual se encuentra en un porcentaje de 285% arriba del límite máximo de la norma.
- La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se encuentra en un porcentaje de 151% arriba del límite máximo de la norma. El límite establecido por la norma para este parámetro es elevado debido a la dificultad de la degradación de la materia orgánica no biodegradable.
- Los Sólidos Sedimentables se encuentran en un porcentaje de 300% arriba de la norma, estos sólidos se puede observar a simple vista en la muestra, debido a la cantidad de sólidos en el agua residual, se deben implementar métodos de eliminación que generan el aumento de los costos y procesos de la industria.
- El único parámetro que cumple con la norma es el análisis de aceites y grasas, el cual se encuentra por debajo del valor máximo permisible, debido a que la muestra de agua residual analizada proveniente de la

fabricación del suero oral oraldex no contenía en su formulación materias primas que contengan grasas.

Se realizó una investigación del proceso de limpieza de la maquinaria empleada para la fabricación del producto; en la cual se emplean detergentes con el fin de remover los restos del suero de los tanques de producción. El resultado de emplear detergente en este proceso de limpieza se refleja en la presencia de aceites y grasas en el resultado del análisis.

El agua residual proveniente del drenaje de la maquinaria de producción de suero oral oraldex contiene 1.5 veces más de materia orgánica no biodegradable de lo que la norma exige, 3 veces más de materia orgánica biodegradable y el triple de contenido de sólidos sedimentables de lo que exige la norma.

Los resultados de los análisis microbiológicos y químicos realizados a la muestra de agua residual en estudio generan una visión del grado de contaminación de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, y no se puede descargar este tipo de agua residual a un cuerpo receptor debido a la sobre carga de contaminantes que posee, por ello es importante realizarle un tratamiento antes de descargarla a un cuerpo receptor.

B. Análisis de resultados después del tratamiento fotocatalítico

- Descripción del agua residual después del tratamiento fotocatalítico

Al final el agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción de suero oral oraldex después del tratamiento fotocatalítico presentó las siguientes características (ver figura N° 27):

- Color: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual fue incolora, debido a que se eliminó el color producido por los restos del suero y del fenol que contenía el agua residual.
- Olor: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual presentó un olor agradable, a limpio que probablemente el responsable sea un compuesto clorado, por su similitud con el olor a la lejía, verificando que el olor producido por el fenol ya no era percibido.
- Aspecto: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual presentó un aspecto claro, incoloro, todos los sólidos suspendidos que contenía el agua residual antes del tratamiento se había eliminado.

- Análisis de resultados microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico reflejan que se logró la total eliminación de los coliformes totales, termotolerantes y *Escherichia coli*, asegurando por medio de este tratamiento que se puede obtener la ausencia de microorganismos en el agua residual cumpliendo con la normativa en un valor del 100% de

eliminación de microorganismos, dando resultados mejores que el límite máximo permisible por la norma, esto comprueba que el método fotocatalítico es efectivo para la desinfección de las aguas residuales, y que garantiza que la composición del agua residual sometida a este tratamiento se encuentra libre de contaminantes microbiológicos.

- Análisis de resultados físico-químicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis físico-químicos después de la aplicación del tratamiento fotocatalítico no solo cumplen con los límites permitidos por la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales, sino que se logra la disminución de cada parámetro con un valor menor al máximo permisible por la norma, entre los cuales están:

- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5): disminuyó en un 70% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, y se logró disminuir este parámetro hasta un 15% menos al límite máximo permisible por norma, debido a que se oxidó la mayoría de materia orgánica biodegradable.
- La Demanda Química de Oxígeno (DQO) disminuyó en un 54% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando disminuir en un 30% menos al límite máximo permisible por la norma, debido a que se produjo la fotooxidación de la mayoría de la materia orgánica no biodegradable.
- Los Sólidos Sedimentables disminuyó en un 89% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando disminuir en un 67% menos al máximo valor permisible por la norma, debido a dos reacciones, por la

oxidación de la fotocatalisis y existe la posibilidad del efecto de la adsorción de los sólidos sedimentables por las partículas del óxido de zinc. Analizados los resultados de los parámetros microbiológicos y físico-químicos y comparando el análisis final del agua residual de producción antes y después del tratamiento fotocatalítico se comprueba la efectividad del tratamiento fotocatalítico, asegurando la posibilidad de descargar el agua libre de contaminación a un cuerpo receptor, contribuyendo en gran medida a la conservación del medio ambiente.

En el cuadro N° 8 se presenta en forma resumida los porcentajes obtenidos de los parámetros analizados, comparado según la NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales. Observando el grado de contaminación del agua residual control proveniente del lavado de la línea de producción de suero oral Oraldex.

Al igual que los porcentajes de disminución del grado de contaminación del agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico, comparado con la muestra control y la normativa NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales

Cuadro N° 8: Análisis porcentual de los parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
SUERO ORAL ORALDEX	Coliformes totales	160,000%	0%	0%
	Coliformes termotolerantes	1,400%	0%	0%
	E. Coli	1,400%	0%	0%
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	285%	70%	15%
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	151%	54%	30%
	Sólidos sedimentables	300%	89%	67%
	Aceites y grasas	No paso el límite de la Norma	40%	50%

5.14.4. Determinación de fenol para el agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico.

A. Análisis de resultados de la determinación de fenol antes del tratamiento fotocatalítico:

La determinación de fenol antes del tratamiento fotocatalítico se encuentra en un porcentaje de 82,400%, el cual sobre pasa al máximo valor permisible por lo establecido por la norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas

residuales (ver cuadro N° 9).

El resultado del análisis de la determinación de fenol es elevado y genera una visión del grado de contaminación de la muestra en estudio, debido a este resultado es necesario aplicar un tratamiento a este tipo de agua residual antes de descargarla en el cuerpo receptor para disminuir el riesgo de contaminación a todo el ecosistema.

Cuadro N° 9. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido Por la Norma NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
SUERO ORAL ORALDEX	ANALISIS FISICO-QUIMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	0.5 mg/L	412 mg/L	0.48 mg/L

B. Análisis de resultados de la determinación de fenol después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis para la determinación de fenol después de realizado el tratamiento fotocatalítico se encuentra con un valor menor al máximo permisible por la NSO 13.49.01:06 disminuyendo en un porcentaje del 99.9% de fenol con respecto a la muestra no tratada, logrando obtener un porcentaje de 4% menos al valor máximo permisible por la norma. Comprobando que el tratamiento fotocatalítico puede disminuir de un porcentaje de 82,400% a un porcentaje del 4% menos del valor máximo permisible por la norma.

Se realizó el mismo procedimiento que se estableció para la muestra de agua residual de jarabe de Ambroxol para determinar el cálculo de estimación del tiempo de residencia, utilizando como valor mínimo el máximo permisible por la norma para agua residual. El cumplimiento de este parámetro complementario establecido en la norma, comprueba que la fotocátalisis es un método efectivo para la eliminación de fenol en agua. (Ver cuadro N° 9).

En el cuadro N° 10 se resume el porcentaje de contaminación que posee la muestra de agua residual control proveniente de la producción de suero oral Orallex, comparada con la NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales.

Cuadro N° 10. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de suero oral Orallex, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
SUERO ORAL ORALDEX	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	82,400%	99.99%	4%

Al igual que el porcentaje de disminución de la muestra de agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico, comparada con la muestra de agua

residual control y con la norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales.

5.14.5. Análisis de los parámetros críticos realizados a la muestra de agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrispot.

Cuadro N° 11: Análisis de parámetros críticos de agua residual de producción de crema fría Artrispot antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
CREMA FRIA ARTRISPORT	ANALISIS MICROBIOLÓGICOS			
	Coliformes totales	10,000 NMP/100ml	16,600 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	Coliformes termotolerantes	2000 NMP/100ml	8,000 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	<i>Escherichia coli</i>	2000 NMP/100ml	8,000 NMP/100ml	<2 NMP/100ml
	ANALISIS FISICO QUIMICOS			
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	100 mg/L	455 mg/L	30 mg/L
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	300 mg/L	550 mg/L	55 mg/L
	Sólidos sedimentables	15 mL/L	72 mL/L	2 mL/L
	Aceites y grasas	30 mg/L	94 mg/L	12 mg/L

En el cuadro N° 11 se presentan los análisis microbiológicos y químicos de los parámetros para verter aguas residuales de tipo especial a un cuerpo receptor provenientes de la fabricación de productos farmacéuticos y

medicamentos, realizados a la muestra de agua residual de producción de crema fría artrispport, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

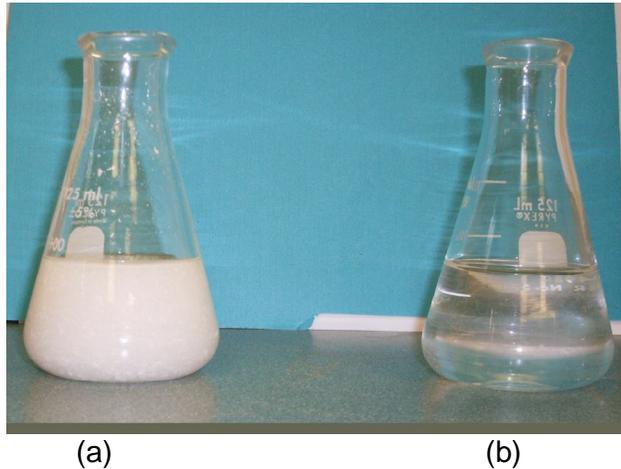


Figura N° 28: Comparación de las muestras de agua residual de producción de crema fría Artrispport, (a) Antes del tratamiento fotocatalítico;(b) Después del tratamiento fotocatalítico

En la figura N° 27 se comparan las diferencias significativas que existen en la muestra de agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrispport antes y después del tratamiento fotocatalítico, demostrando así la efectividad del método en la desinfección y descontaminación del agua de desecho.

A. Análisis de resultados antes de Tratamiento Fotocatalítico.

- Descripción del agua residual:

El agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción de la crema fría artrisport, antes del tratamiento fotocatalítico poseía las siguientes características entre las cuales estaban: (Ver figura 28)

- Color: Blanco producido por la composición de la crema fría artrisport, el color se debió a los componentes de la formulación de la crema que posee materias primas que en su mayoría están formadas por aceites y ácidos grasos los cuales no logran solubilizarse con el agua.
- Olor: Característico a mentol, debido a que la crema contenía esta materia prima en su formulación, en menor grado un olor característico a fenol.
- Aspectos: Poseía un aspecto lechoso color blanco, contenía gran cantidad de sólidos suspendidos de elevado tamaño, aún así la cantidad de sólidos sedimentables se debió a las diferentes grasas que posee la formulación de la crema las cuales no se disuelven con el agua sino que forman grumos favoreciendo su visualización.

- Análisis de resultados microbiológicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Se observa que los resultados de los análisis microbiológicos realizados antes del tratamiento fotocatalítico se encuentran con un valor que sobre pasa a los límites máximos permisibles por la normativa, los parámetros analizados son:

- Los Coliformes totales se encuentran en un porcentaje de 166% arriba del límite establecido por la norma.
- Los Coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* se encuentran cada uno en un porcentaje de 400% arriba del límite establecido por la norma.

Este alto grado de contaminación fué posible a la presencia de microorganismos depositados en las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción ya que estas permanecen la mayor parte del tiempo húmedo lo cual es esencial para el crecimiento de microorganismos para eliminarlos.

La acción de la solución de fenol al 4% utilizado como un desinfectante es efectiva en el área de la maquinaria de producción, pero no en el área de las tuberías de drenaje donde el fenol pasa rápidamente no logrando un tiempo de contacto suficiente con los microorganismos.

- Análisis de resultados químicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis químicos realizados antes del tratamiento fotocatalítico sobre pasa los límites máximos permisibles por la norma, entre los que están:

- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) el cual se encuentra en un porcentaje de 455% arriba del límite máximo de la norma a pesar que el valor máximo permisible establecido por la norma es elevado comparado con el límite de la normativa venezolana.
- La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se encuentra en 183% arriba del límite máximo de la norma. El límite establecido por la norma es

elevado debido a la dificultad de degradar la materia orgánica no biodegradable.

- Los sólidos sedimentables se encuentran en un porcentaje de 480% arriba de la norma, este se debió a los diferentes sólidos y partículas de la crema que contenía la muestra en estudio.
- El análisis del parámetro de aceites y grasas en este tipo de agua residual sobre pasó el límite máximo permisible por la norma en un porcentaje de 313%, debido a los componentes de la formulación de la crema los cuales posee propiedades físicas y químicas grasosas, esto se muestra en el parámetro del análisis de aceites y grasas, dando resultados elevados.

Se realizó una investigación del proceso de limpieza de la maquinaria empleada para la fabricación del producto; en la cual se emplean detergentes con el fin de remover los restos de la crema de los tanques de producción.

El resultado de emplear detergente y los componentes de la formulación de la crema se refleja en la presencia de aceites y grasas en el resultado del análisis.

El agua residual proveniente del drenaje de la maquinaria de producción de crema fría artrisport contiene igual cantidad alta de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, pero contiene 300 veces más de sólidos sedimentables de lo permitido por la norma.

Los resultados obtenidos de los parámetros analizados del agua residual en estudio generan una visión de la elevada contaminación de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, por ello este tipo de agua residual no se puede descargar a un cuerpo receptor debido al daño que se le puede producir al ecosistema.

B. Análisis de resultados después del tratamiento fotocatalítico

- Descripción del agua residual después del tratamiento fotocatalítico

El agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción de crema fría Artrispot sometida al tratamiento fotocatalítico presentó las siguientes características: (ver figura 28)

- Color: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual fue incolora, debido a que se eliminó el color blancuzco producido por los restos de la crema.
- Olor: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual presentó un olor agradable, a limpio que probablemente el responsable sea un compuesto clorado, por su similitud con el olor a la lejía, verificando que el olor producido por el mentol y el fenol ya no era percibido.
- Aspecto: Después del tratamiento fotocatalítico el agua residual presentó un aspecto claro, incoloro y los sólidos suspendidos que contenía el agua residual antes de tratamiento se eliminaron.

- Análisis de resultados microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico reflejan que se logró la total eliminación de los coliformes totales, termotolerantes y la *Escherichia coli*, asegurando por medio de este tratamiento que se puede lograr la ausencia de microorganismos en el agua residual cumpliendo con la normativa en un valor del 100% de eliminación de microorganismos, dando resultados mejores que el límite máximo permisible por la norma, esto comprueba que el método fotocatalítico es efectivo para la desinfección de las aguas residuales, y que garantiza que la composición del agua residual sometida a este tratamiento se encuentra libre de contaminantes microbiológicos.

- Análisis de resultados físico-químicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis físico-químicos después de la aplicación del tratamiento fotocatalítico no solo cumplen con los límites permitidos por la NSO 13.49.01:06 aplicada para aguas residuales, sino que se logra la disminución de cada parámetro con un valor mucho menor al máximo permisible por la norma, entre los que están:

- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): disminuyó en un porcentaje de 93% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, y se logró disminuir este parámetro hasta un 70% menos al límite máximo permisible por norma, debido a la oxidación de la materia orgánica en el agua residual.

- La Demanda Química de Oxígeno (DQO): disminuyó en un 90% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando disminuir en un 82% menor al límite máximo permisible por la norma, debido a la fotooxidación de la materia orgánica no biodegradable.
- Los Sólidos Sedimentables: disminuyó en un 97% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando disminuir en un 87% menos al máximo valor permisible por la norma, generado por dos tipos de reacción; la oxidación por la reacción fotocatalítica y la posible existencia del efecto de adsorción de los sólidos sobre las partículas de óxido de zinc.
- La determinación de aceites y grasas disminuyó en un porcentaje de 87% con respecto a la muestra no tratada, logrando disminuir en un 60% menos al máximo valor permisible por la norma. (Ver cuadro N° 11).

La disminución del análisis de aceites y grasas fué producida por la fotodegradación de los componentes de la formulación de la crema debido a que estas materias primas grasas están formadas por materia orgánica la cual es oxidada por los radicales oxidrilos y por los hoyos de las partículas del óxido de zinc generados en la reacción fotocatalítica.

Analizados los resultados de los parámetros microbiológicos y químicos y comprando el análisis final del agua residual de producción antes y después del tratamiento fotocatalítico se comprueba la efectividad del tratamiento fotocatalítico.

El agua residual de la crema fría Artrisport presenta menores valores en los parámetros de DQO, DBO₅ y fenol debido a que el método de limpieza de la

maquinaria es distinto, en comparación con el método de limpieza del equipo de producción de los otros dos tipos de agua residual en estudio. Estos parámetros se ven disminuidos porque el residuo de la crema en la maquinaria de producción es removido manualmente con papel adsorbente principalmente, luego se procede a la limpieza del área de producción con la solución del fenol al igual que el caso de las otras dos líneas de producción.

El equipo de producción no se lava con fenol, si no que se lava con detergente y agua desmineralizada, esta es la razón de que el fenol se encuentre en menor concentración en el agua residual.

En el cuadro N° 12 se presenta en forma resumida los porcentajes obtenidos de los parámetros analizados, comparado según la NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales. Observando el grado de contaminación del agua residual control proveniente de la crema fría atrisport.

Al igual que los porcentajes de disminución del grado de contaminación del agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico, comparado con la muestra control y la normativa NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales

Cuadro N° 12: Análisis porcentual de los parámetros críticos para el agua residual proveniente de la producción de crema fría artrispport, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
CREMA FRÍA ARTRISPORT	Coliformes totales	166%	0%	0%
	Coliformes termotolerantes	400%	0%	0%
	E. Coli	400%	0%	0%
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	455%	93%	70%
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	183%	90%	82%
	Sólidos sedimentables	480%	97%	87%
	Aceites y grasas	313%	87%	60%

5.14.6 Determinación de fenol de agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de crema fría Artrispport antes y después del tratamiento fotocatalítico.

A. Análisis de resultado de la determinación de fenol antes del tratamiento fotocatalítico:

La determinación de fenol antes del tratamiento fotocatalítico se encuentra en un porcentaje de 24,400%, el cual sobre pasa al máximo valor permisible

por la establecido por la norma (ver cuadro No. 13).

Cuadro N° 13. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrispport, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
Crema fría Artrispport	ANALISIS FISICO-QUIMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	0.5 mg/L	122 mg/L	0.42 mg/L

El resultado de este parámetro proporciona una visión del grado de contaminación que posee el agua residual y del peligro de descargar este tipo de agua a un cuerpo receptor, por ello la importancia de aplicar un tratamiento que disminuya este parámetro hasta un valor menor al máximo permisible por la norma.

B. Análisis de resultados de la determinación de fenol después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis para la determinación de fenol después de realizado el tratamiento fotocatalítico se encuentra con un valor menor al máximo permisible por la norma (NSO 13.49.01:06) disminuyendo en un porcentaje del 99.7% de fenol con respecto a la muestra no tratada, logrando obtener un porcentaje de 16% menos al valor máximo permisible por la norma. Se demuestra que el tratamiento fotocatalítico puede disminuir de un 24,400% a un porcentaje de 16% menos del valor máximo permisible por la norma.

El cumplimiento de este parámetro complementario establecido en la norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales, comprueba que la fotocátalisis es un método efectivo para la eliminación de fenol en agua. (Ver cuadro N° 13).

Cuadro N° 14. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
CREMA FRÍA ARTRISPORT	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	24,400%	99.7%	16%

En el cuadro N° 14 se resume el porcentaje de contaminación que posee la muestra de agua residual control proveniente de la producción de crema fría artrisport, comparada con la NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales.

Al igual que el porcentaje de disminución de la muestra de agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico, comparada con la muestra de agua residual control y con la norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales.

5.15 Análisis de las muestras de agua residual en estudio según NSO

13:07.01:04 establecida para agua potable. ⁽¹¹⁾

Se realizaron análisis de los parámetros críticos según la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO.13:07.01:04 para la Calidad de Agua Potable a las muestras de jarabe de Ambroxol, suero oral Oraldex y crema fría Artrispport antes y después del tratamiento fotocatalítico, con la finalidad de conocer que la calidad del agua tratada cumple con la normativa. ⁽¹¹⁾

5.15.1. Análisis de los parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol.

Los resultados de estos análisis servirán para verificar la calidad de las aguas tratadas con respecto al agua potable y comprobar que con el tratamiento fotocatalítico a aguas residuales de la industria farmacéutico es posible obtener agua que cumpla los parámetros de la NSO 13:07.01:04 establecida para agua la calidad de agua potable.

Cuadro N° 15: Análisis de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento Fotocatalítico
JARABE DE AMBROXOL	ANALISIS MICROBIOLÓGICOS			
	Coliformes totales	<1.1 NMP/100MI	>8.0 NMP/100mL	<1.1 NMP/100MI
	Coliformes termotolerantes	NEGATIVO	>8.0 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	<i>Escherichia coli</i>	NEGATIVO	>8.0 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	ANALISIS FISICO QUIMICOS			
	pH	6.5 – 8.5	5.5	6.7
	Color	15 pt-Co	55 pt-Co	3 pt-Co
	Turbidez	5 UNT	85 UNT	0.3 UNT
	Hierro total	0.1 mg/L	0.45 mg/L	0.013 mg/L
	Manganeso total	0.1 mg/L	0.75 mg/L	0.027 mg/L
	Dureza	200 mg/L	250.4 mg/L	39.4 mg/L
	Sulfatos	500 mg/L	355 mg/L	125 mg/L
	Zinc total	5 mg/L	1.34 mg/L	2.40 mg/L

A. Análisis de resultados antes del tratamiento fotocatalítico.

- Descripción del agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol:

El agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol antes del tratamiento fotocatalítico presentó las mismas características de color, olor y aspecto descritas anteriormente.

- Análisis de resultados microbiológicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados microbiológicos de los parámetros críticos analizados antes del tratamiento fotocatalítico se encuentran con un valor que sobre pasa el límite permitido por la norma para la calidad de agua potable, entre los parámetros analizados están:

- La determinación de coliformes totales, coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* se encuentran con un valor elevado con respecto a la norma, debido que la norma establece un valor de 0% de contaminación microbiológica.

Esto se debe posiblemente a la presencia de microorganismos depositados en las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción, ya que estas se encuentran la mayor parte del tiempo húmedas siendo esencial para el crecimiento de microorganismos.

La acción del fenol al 4% empleado como desinfectante de la maquinaria de producción del jarabe de Ambroxol es efectiva en el área de la maquinaria de producción pero no en las tuberías de drenaje, debido a que el tiempo de contacto del fenol con las paredes de la tubería es demasiado corto para eliminar el crecimiento microbiano.

Análisis de resultados físico-químicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Los análisis de los resultados físico-químicos efectuados antes del tratamiento fotocatalítico se encuentran con un valor que sobrepasa al máximo valor permisible por la norma, entre los parámetros analizados están:

- El pH se encuentra por debajo del valor mínimo del rango establecido por la norma con un pH = 5.5, este resultado posiblemente sea debido a la acidez que posee el fenol y el pH del jarabe que oscila entre 5.7 y 6.2 unidades de pH.
- El color se encuentra con un porcentaje de 367% sobre el máximo valor permisible por la norma, el resultado fué debido al color que poseía el agua residual y la cantidad de partículas suspendidas.
- La turbidez se encuentra con un porcentaje de 1,700% por encima del valor límite de la norma, este resultado fue debido a las diferentes partículas suspendidas y sedimentables que contenía el agua residual.
- El hierro total se encuentra con un porcentaje de 450% sobre el máximo valor permisible por la norma, el resultado de este parámetro se debió a la posible presencia de partículas de óxido férrico de las tuberías de drenaje.
- El manganeso total se encuentra con un porcentaje de 750% arriba del máximo valor permisible por la norma, este resultado muestra la presencia manganeso de las tuberías de drenaje del área de producción.
- La dureza se encuentra con porcentaje de 25.2% arriba del máximo valor permisible por la norma, este resultado se debió a la presencia de sales que aumentan la dureza y que se encuentran disueltas en el agua residual.

- La determinación de sulfatos en el agua residual se encuentra dentro del rango establecido por la norma, puesto que la formulación del producto no contiene sulfatos y en la tubería de drenaje no se acumulan por su solubilidad debido a que el sulfato es soluble en agua y por ello no queda adherido a las paredes de la tubería de drenaje.
- El parámetro de zinc se encuentra con un valor por debajo del máximo permisible por la norma. La presencia de estas trazas de zinc posiblemente su fuente sea el agua de lavado de la maquinaria.

El agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción del jarabe de Ambroxol posee un alto grado de contaminación microbiológica que sobre pasa el límite máximo permisible establecido por la norma para la calidad de agua potable.

Los resultados químicos de los diferentes parámetros analizados de la muestra contiene un grado de contaminación por encima de los límites máximos permisibles establecidos por la norma de agua potable, observando que existe más del triple en magnitud del grado de color, más del 1000% de grado de turbidez, más del 400% de contenido de hierro total y 700% veces más de contenido de manganeso total.

Los resultados de los análisis físicos y microbiológicos demuestran que esta agua no es apta para el consumo humano, debido al alto contenido de color, hierro, manganeso, contenido, turbidez y contaminación microbiológica que presentaba la muestra. (8)

Este tipo de agua residual descargada al afluente no cumple con las normas de agua potable, ni mucho menos tiene características similares al “agua zarca”, que es el agua de consumo en algunas zonas rurales del país.

B. Análisis de resultados después del tratamiento fotocatalítico.

- Descripción del agua residual después del tratamiento fotocatalítico

El agua residual obtenida después del tratamiento fotocatalítico presentó las siguientes características entre las cuales están:

- Color: Incolora, la muestra no presentaba tonalidad debido a que se eliminaron todos los contaminantes que le proporcionaban color a la muestra de agua residual.
- Olor: La muestra de agua residual presentó un olor agradable, el olor característico a fenol y al jarabe de Ambroxol ya no era perceptible, logrando la eliminación del fenol y de los demás contaminantes en el agua residual.
- Aspecto: La muestra de agua residual después del tratamiento fotocatalítico no presentaba color, turbidez y sólidos suspendidos.

- Análisis microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis microbiológicos realizados a la muestra de agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción después del tratamiento fotocatalítico se observa que se logró la total eliminación de la carga microbiana en un porcentaje de 0% por la técnica de tubos múltiples utilizando como medio de cultivo fluorocult y al colocarlos en la lámpara UV no se observa fluorescencia cumpliendo con el límite

establecido por la norma para la calidad de agua potable.⁽¹⁴⁾ Comprobando que el tratamiento fotocatalítico es efectivo para la eliminación de contaminación microbiana, garantizando la ausencia de estos en el agua residual, obteniendo un valor <1.1 NMP/100mL.

- Análisis de resultados físico-químicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis químicos realizados a la muestra de agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción después del tratamiento fotocatalítico, reflejan que se logró la disminución de los parámetros analizados, logrando un valor mucho menor al máximo permisible establecido por la norma. Entre los parámetros analizados están:

- El pH de la muestra se reguló a un pH = 6.5 con el que se obtuvieron mejores resultados en el estudio cinético para realizar el tratamiento fotocatalítico, después de realizado el tratamiento el pH que presentó la muestra fué de 6.7, el cual se encuentra dentro del rango establecido en la norma para la calidad del agua potable.
- El color disminuyó en un porcentaje de 95% con respecto a la muestra de agua residual contaminada, llevando este parámetro en un 80% menos al límite máximo establecido por la norma, la disminución en el resultado de este parámetro fue debido a la oxidación de la materia orgánica coloreada

principalmente, oxidación producida por los radicales oxidrilo (OH^{\bullet}) generados por la reacción fotocatalítica.

- La turbidez disminuyó en un porcentaje de 99.7% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando obtener un porcentaje de 94% menor al valor máximo permisible, la disminución del resultado de este parámetro se debió a dos factores: La oxidación de la materia orgánica por los radicales oxidrilo generados en el proceso fotocatalítico y por el posible proceso del efecto de adsorción de los sólidos suspendidos sobre las partículas de óxido de zinc.

- La determinación de hierro total disminuyó en un porcentaje de 97% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando obtener un porcentaje de 87% menor al valor máximo permisible por la norma para agua potable. La disminución de este parámetro se debió al proceso de reducción del óxido férrico en el agua residual, generada por las partículas de óxido de zinc en el tratamiento fotocatalítico, estas partículas de óxido de zinc pueden reducir metales debido a que su banda de conducción se carga en forma negativa por los electrones que se promueven de su banda de valencia hacia la banda de conducción. ⁽¹²⁾

- La determinación de manganeso disminuyó en un porcentaje de 96% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando disminuir en un porcentaje de 73% abajo del valor límite establecido en la normativa NSO 13:07.01:04 establecida para agua potable. La disminución de este parámetro se debió a la reducción del manganeso en el agua residual por

la acción de los radicales oxidrilo generados en el proceso fotocatalítico, capaz de reducir metales.

- La dureza disminuyó en un porcentaje de 84% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, obteniendo un valor menor al límite máximo permisible por la norma en un porcentaje de 92%. La disminución del resultado de este parámetro se logró por la eliminación de los iones pesados debido a la reducción de los metales pesados, esta reducción fué generada por las partículas de óxido de zinc en el tratamiento fotocatalítico. ⁽¹⁰⁾

- En la determinación de sulfatos el resultado del análisis no pasó del límite máximo permisible por la norma, pero el tratamiento fotocatalítico disminuyó el resultado obtenido de la muestra de agua residual no tratada fotocatalíticamente en un porcentaje de 65%, logrando un valor mucho menor que el máximo permisible por la norma. La disminución de este parámetro se obtiene por los radicales oxidrilos responsables de la reducción del sulfato por del efecto de adsorción sobre las partículas de óxido de zinc, pero en este experimento no se produjo el efecto de reducción del sulfato debido a que se necesita más energía generada por los radicales oxidrilo que la máxima producida en el tratamiento fotocatalítico que es de 3.2 eV, energía para reducir el SO_4^{-2} que se encuentra en su estado máximo de oxidación. ⁽¹¹⁾

- El resultado de la determinación de Zinc total refleja un aumento, debido a la adición del fotocatalizador óxido de zinc empleado en el tratamiento a la

muestra de agua residual, aun así el aumento de este parámetro después del tratamiento no pasa del valor máximo permisible por la norma para la calidad de agua potable.

Los resultados de los análisis microbiológicos y fisicoquímicos demuestran que el agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de jarabe de Ambroxol sometida al tratamiento fotocatalítico cumple con algunos de los parámetros críticos según la NSO.13:07.01:04 para la Calidad del Agua Potable

Los resultados anteriores realizados después del tratamiento fotocatalítico demuestran que el tratamiento propuesto podría convertirse en un método capaz de potabilizar agua como una herramienta alternativa y novedosa, realizando a la vez estudios más profundos sobre la calidad del agua sometida al tratamiento.

En el cuadro N° 16 se resumen en forma porcentual los resultados de los diferentes parámetros analizados, observando el grado de contaminación de la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, según la NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable.

Al igual que los porcentajes de la disminución de los resultados de los diferentes parámetros de la muestra de agua residual proveniente de lavado de la línea de producción sometida al tratamiento fotocatalítico, comparados

con respecto a la muestra control y a la Norma de calidad NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable.

Cuadro N° 16: Análisis porcentual de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable
JARABE DE AMBROXOL	Coliformes totales	Presencia alta	0%	0%
	Coliformes termotolerantes	Presencia alta	0%	0%
	E. Coli	Presencia alta	0%	0%
	pH	Dentro del rango	6.7	6.7
	Color	367%	95%	80%
	Turbidez	1,700%	99.7%	94%
	Hierro total	450%	97%	87%
	Manganeso total	750%	96%	73%
	Dureza	25.2%	84%	92%
	Sulfatos	Por debajo del límite de la Norma	Dentro	65%
	Zinc	Por debajo del límite de la Norma	Dentro de la Norma (mínimo aumento)	Por debajo del límite de la Norma

5.15.2. Determinación de fenol en el agua residual de producción proveniente de la producción de jarabe de ambroxol antes y después del tratamiento fotocatalítico.

El resultado del análisis de fenol para una muestra de agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol antes y después del tratamiento fotocatalítico según *Las Normas Oficiales para la Calidad del Agua México*,⁽²¹⁾ se encuentra en el cuadro N° 17. (Se utilizó el valor máximo permisible establecido en la Norma Mexicana debido a que no se encontró el parámetro del fenol en la NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable, El Salvador).

Cuadro N° 17. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico. (*)

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, establecida para agua potable	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
JARABE DE AMBROXOL	ANALISIS FISICO-QUIMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	0.001 mg/L	400.13 mg/L	0.0009 mg/L

(*) Según Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

A. Análisis de resultados antes del tratamiento fotocatalítico:

El resultado de la determinación de fenol en la muestra de agua residual antes del tratamiento fotocatalítico se encuentra en un porcentaje de 40,013,000% arriba de la norma, este resultado es alarmante debido a la elevada concentración de este contaminante en el agua residual.

No se encontró en la normativa salvadoreña NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable; el valor máximo permisible de la determinación de fenol por ello se tomó el valor máximo de otra normativa para verificar la

aprobación de que el agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico cumpla con el valor máximo permisible.

Se tomó la normativa mexicana que es la que más se asemeja a la de nuestro país y de donde se tomaron ciertos valores máximos permisibles para la normativa salvadoreña. (11)

Cuadro N° 18. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción de jarabe de Ambroxol, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
JARABE DE AMBROXOL	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	40, 013,000%	99.97%	10%

En el cuadro N° 18 se resume el porcentaje de contaminación que posee la muestra de agua residual control proveniente del lavado de la línea de producción de jarabe de ambroxol, comparada con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable.

Al igual que el porcentaje de disminución de la muestra de agua residual proveniente del lavado de la línea de producción sometida al tratamiento

fotocatalítico, comparada con la muestra de agua residual control y con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable

B. Análisis de resultado de fenol después del tratamiento fotocatalítico:

Los límites máximos permitidos de fenol en la normativa salvadoreña para la calidad de agua potable no se encuentran especificados, por el motivo de ser un contaminante que debe estar ausente en ella para ser considerada como agua potable. Mas sin embargo se investigaron los límites en la normativa mexicana con la finalidad de definir los límites de este contaminante presente en la muestra a analizar.

Los resultados obtenidos después del tratamiento fotocatalítico reflejan una disminución de la determinación de fenol en un 99.97% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, necesitando un tiempo de residencia de 22 horas para disminuir un porcentaje de 10% menor al máximo permisible por la norma mexicana.⁽²¹⁾

Se empleó el mismo modelo matemático experimental obtenido para el fenol en la sección de la determinación de fenol según la normativa para aguas residuales. Se realizó el cálculo para obtener un tiempo de residencia necesario para llevar a un porcentaje de 10% menor al máximo permisible por la norma.

Los resultados obtenidos de la determinación de fenol después del tratamiento fotocatalítico reflejan que se logró la eliminación de este contaminante de difícil remoción de la muestra de agua residual, de forma que se considera el agua después del tratamiento apta para el consumo humano, de acuerdo con los parámetros críticos analizados.

5.15.3. Análisis de los parámetros críticos de la muestra de agua residual de proveniente de la producción de suero oral Oraldex.

Cuadro N° 19: Análisis de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
SUERO ORAL ORALDEX	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS			
	Coliformes totales	<1.1 NMP/100mL	8.0 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	Coliformes termotolerantes	NEGATIVO	4.6 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	<i>Escherichia coli</i>	NEGATIVO	4.6 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS			
	pH	6.5 – 8.5	6.2	6.5

Continuación cuadro N° 19				
Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
SUERO ORAL ORALDEX	Color	15 Pt-Co	75 Pt-Co	2 Pt-Co
	Turbidez	5 UNT	99 UNT	1.2 UNT
	Hierro total	0.1 mg/L	0.5 mg/L	0.015 mg/L
	Manganeso total	0.1mg/L	0.7 mg/L	0.027 mg/L
	Dureza	200 mg/L	287.34 mg/L	45.38 mg/L
	Sulfatos	500 mg/L	124.67 mg/L	74 mg/L
	Zinc total	5 mg/L	1.25 mg/L	2.5 mg/L

En el cuadro N° 19 se presentan los resultados de los análisis microbiológicos y químicos de los parámetros críticos, realizados a la muestra de agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de suero oral Oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico según la norma NSO 13:07.01:04.

A. Análisis de resultado antes del tratamiento fotocatalítico.

Descripción del agua residual:

El agua residual proveniente de la maquinaria de producción de suero oral oraldex antes del tratamiento fotocatalítico presentó las mismas características de color, olor y aspecto descritas anteriormente. (ver Figura N° 27 en anexos)

La muestra de agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción de suero oral Oraldex presentó las siguientes características:

Análisis de los resultados microbiológicos antes del tratamiento fotocatalítico.

Los resultados microbiológicos de los parámetros críticos analizados antes del tratamiento fotocatalítico se encuentran con un valor fuera del límite permitido por la norma, entre las cuales están:

- La determinación de las coliformes totales, coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* se encuentran con un valor elevado que pasa del límite de la norma debido a que está establece un valor de 0% de contaminación microbiológica tal como se discutió anteriormente.

Análisis de los resultados químicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Los análisis de los resultados químicos efectuados antes del tratamiento fotocatalítico se encuentran con un valor que sobrepasa al máximo permisible por la norma, entre los parámetros analizados están:

- El pH de la muestra de agua residual era de 6.2, valor que se encuentra por debajo del valor mínimo del rango establecido por la norma que es de 6.5. Este valor de pH fue debido a la acidez del fenol y del suero oral que oscila en un pH de 6.0 a 6.7.
- El color se encuentra con un porcentaje de 500% fuera del máximo valor permisible por la norma, el resultado fué debido al color que poseía el agua residual y a la cantidad de partículas suspendidas.

- La turbidez se encuentra con un porcentaje de 1,980% por encima del valor límite de la norma, este resultado fué debido a las diferentes partículas suspendidas y sedimentables que contenía el agua residual,
- El hierro total se encuentra con un porcentaje de 500% fuera del máximo valor permisible por la norma, el resultado de este parámetro se debió a la posible presencia de partículas en las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción.de ion ferrico Fe^{+3} en el tratamiento fotocatalítico.
- El manganeso total se encuentra con un porcentaje de 700% arriba del máximo valor permisible por la norma, este resultado fué posible a la presencia de manganeso de las tuberías de drenaje del área de producción.
- La dureza se encuentra con porcentaje de 44% arriba del máximo valor permisible por la norma, este resultado se debió a la presencia de sales que aumentan la dureza del agua residual.
- La determinación de sulfatos en el agua residual se encuentra dentro del rango establecido por la norma, debido a que la muestra de agua residual no contiene sulfato y por la solubilidad del sulfato el cual no se adhiere a las paredes de la tubería de drenaje.
- El parámetro de zinc se encuentra con un valor por debajo del máximo permisible por la norma, el resultado de este parámetro se debió a la posible presencia de trazas de zinc en el agua de lavado de la maquinaria de producción.

Los resultados de los análisis microbiológicos y químicos obtenidos proporcionan una visión del tipo de agua residual que no se sometió al tratamiento fotocatalítico y del grado de contaminación que presentaba la muestra.

La muestra de agua residual presentó una contaminación microbiológica en la cual la determinación de coliformes totales, termotolerantes y *Escherichia coli* se encuentran en un porcentaje elevado de más de 80,000% de presencia de microorganismos.

La contaminación química presentó porcentajes de 500% de color en la muestra, casi el 2,000% de turbidez indicando la cantidad de materiales suspendidos y sedimentables que contenía la muestra, el 500% de presencia de hierro, el 700% de presencia de manganeso.

Los resultados de los diferentes análisis microbiológicos y fisicoquímicos reflejan que el agua residual no sometida al tratamiento no es apta para el consumo humano debido al elevado grado de contaminación microbiológica y química debido al color, turbidez, hierro y manganeso que contiene el agua residual.

B. Análisis de resultados después del tratamiento fotocatalítico.

Análisis de resultados microbiológico después del tratamiento fotocatalítico

Los resultados de los análisis microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico reflejan la eliminación de la carga microbiana que poseía la muestra de agua residual, tanto en la determinación de las coliformes

totales, termotolerantes y *Escherichia coli* en un porcentaje de 0% de contaminación al no observar fluorescencia en los tubos analizados por la técnica obteniendo como resultado <1.1 NMP/100 mL, garantizando así la ausencia de microorganismos en el agua residual analizada.

El resultado de este parámetro refleja que el tratamiento fotocatalítico es efectivo para la eliminación de microorganismos y de bacterias como la *Escherichia coli* en el agua residual.

Análisis de resultados químicos después del tratamiento fotocatalítico

Los resultados de los análisis químicos después del tratamiento fotocatalítico reflejan una disminución de los parámetros, obteniendo resultados menores a los límites máximos permisibles por la norma. Entre los parámetros analizados están:

- El pH del agua residual se reguló a un pH de 6.2 con el cual se obtuvo mejores resultados en el estudio cinético, al final del tratamiento el pH fue de 6.5 el cual se encontraba dentro del rango de la norma.
- El color disminuyó en un porcentaje de 97% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, obteniendo un resultado menor al máximo permisible por la norma en un porcentaje de 87%. La disminución de este parámetro se debió a la oxidación de la materia orgánica coloreada que contenía disuelta el agua residual.

- La determinación de la turbidez disminuyó en un porcentaje de 98% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, el resultado obtenido es menor al máximo valor permisible por la norma en un porcentaje de 76%. La disminución de este resultado se debió a la oxidación de la fotocatalisis y por el posible efecto de adsorción de los sólidos sobre las partículas de óxido de zinc.
- La determinación de hierro total disminuyó en un porcentaje de 97% con respecto a la muestra no sometida al tratamiento fotocatalítico, obteniendo un valor menor al máximo permisible por la norma en un porcentaje de 85%. Debido a la reducción del ion ferrico Fe^{+3} en el tratamiento fotocatalítico.
- La determinación de manganeso total disminuyó en un porcentaje de 96% respecto a la muestra de agua residual no tratada, obteniendo un valor menor al máximo permisible por la norma en un porcentaje de 73%. Debido a la reducción del manganeso en la reacción fotocatalítica.
- La determinación de la dureza disminuyó en un porcentaje de 84% con respecto a la muestra no tratada, obteniendo un valor del 77% menor al máximo permisible por la norma. Este parámetro disminuyó debido a la eliminación de los iones metálicos por la reducción de los metales pesados, reducción generada por la reacción fotocatalítica.

- La determinación de sulfatos no sobrepasó el límite de la normativa obteniendo como resultado un valor de 41% por debajo de ésta, con el tratamiento se disminuyó este parámetro en un porcentaje de 85% debajo de la norma. La disminución de este parámetro se debió al efecto de adsorción del sulfato hacia las partículas de óxido de zinc.
- El resultado de la determinación de zinc de la muestra tratada presentó un aumento debido a la adicción del fotocatalizador empleado en el tratamiento fotocatalítico, aun así el resultado de este parámetro no pasó del límite de la norma.

La muestra de agua residual de suero oral Oraldex después del tratamiento fotocatalítico presentó las siguientes características, entre las cuales están:

- Color: Incolora, la muestra de agua residual ya no presentó el color que la proporcionaba la presencia de diferentes contaminantes disueltos y suspendidos que contenía.
- Olor: Olor agradable, la muestra de agua residual de suero oral oraldex después del tratamiento fotocatalítico no presentó olor característico a fenol y a los demás contaminantes disueltos en el agua residual.
- Aspecto: La muestra de agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico fue inodora e incolora, debido a que ya no presentaba las diferentes

partículas suspendidas y sedimentables que contenía al inicio del tratamiento.

Cuadro N° 20: Análisis porcentual de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable
SUERO ORAL ORALDEX	Coliformes totales	Presencia alta	0%	0%
	Coliformes termotolerantes	Presencia alta	0%	0%
	E. Coli	Presencia alta	0%	0%
	pH	Dentro del rango	6.5	6.5
	Color	500%	97%	85%
	Turbidez	1,850%	96%	76%
	Hierro total	500%	97%	85%
	Manganeso total	700%	96%	73%
	Dureza	44%	84%	97%
	Sulfatos	Por debajo del límite de la Norma	41%	85%
	Zinc	Por debajo del límite de la Norma	Dentro de la Norma (mínimo aumento)	Por debajo del límite de la Norma

En el cuadro N° 20 se resumen en forma porcentual los resultados de los diferentes parámetros analizados, observando el grado de contaminación de la muestra de agua residual proveniente de producción de suero oral Oraldex, según la NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable.

Los resultados de los análisis microbiológicos y fisicoquímicos demuestran que el agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de crema fría artrisport sometida al tratamiento fotocatalítico cumple con algunos de los parámetros críticos según la NSO.13:07.01:04 para la Calidad del Agua Potable

Los resultados anteriores realizados después del tratamiento fotocatalítico demuestran que el tratamiento propuesto podría convertirse en un método capaz de potabilizar agua como una herramienta alternativa y novedosa, realizando a la vez estudios más profundos sobre la calidad del agua sometida al tratamiento.

Al igual que los porcentajes de la disminución de los resultados de los diferentes parámetros de la muestra de agua residual proveniente de lavado de la línea de producción sometida al tratamiento fotocatalítico, comparados con respecto a la muestra control y a la Norma de calidad NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable.

5.15.4. Determinación de fenol para el agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico.

El resultado del análisis de fenol para la muestra de agua residual de producción de suero oral oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico según la Normas Oficiales para la Calidad del Agua México ⁽²¹⁾, se encuentran en el cuadro N° 21, (Se empleó el límite de la norma mexicana debido a que no se encontró el parámetro del fenol en la

NSO.13:07.01:04 establecida para agua potable).

Cuadro N° 21. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico. (*)

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Límite establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable	Resultado Antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
Suero oral Oraldex	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	0.001 mg/L	412 mg/L	0.00087 mg/L

(*) Según Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, (21)

A. Análisis de resultado antes del tratamiento fotocatalítico:

El resultado de la determinación de fenol en una muestra de agua residual antes del tratamiento fotocatalítico se encuentra en un porcentaje de 41,200,000% arriba de la norma, este resultado es alarmante debido a la elevada concentración. El fenol se determinó como el contaminante para estimar el tiempo de residencia para la degradación del fenol y para determinar la calidad del agua.

Según la normativa salvadoreña NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable, se considera el agua sometida al tratamiento fotocatalítico apta para el consumo humano sin la determinación del fenol debido a que no se encuentra la determinación de este contaminante para la determinación de la calidad de agua potable, pero como se tenía el conocimiento de la presencia de fenol en el agua tratada se decidió realizar la determinación de este

contaminante utilizando como valor máximo permisible de la normativa mexicana. (21)

B. Análisis de resultado después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de la determinación de fenol obtenidos después del tratamiento fotocatalítico reflejan la degradación del fenol de la muestra de agua residual en un 99.99% en un tiempo calculado teóricamente de 22 horas de reacción. La disminución de este parámetro se debió a la oxidación del fenol del agua residual. Se empleó el mismo modelo matemático experimental para determinar el tiempo de residencia para la degradación de fenol utilizando como valor mínimo de concentración de fenol en el agua tratada el máximo permisible por la normativa mexicana. Se realizaron los cálculos para determinar una disminución de un porcentaje de 10% menor al máximo permisible por la norma.(21)

Los resultados reflejan que el agua cumple con los parámetros críticos según la normativa salvadoreña y con la determinación de fenol según la normativa mexicana, con la cual se aprueba que la calidad del agua sometida al tratamiento esta libre de contaminantes y podría ser la pauta para investigar a profundidad la facultad de que sea apta para el consumo humano.

Los resultados de los análisis microbiológicos y fisicoquímicos demuestran que el agua residual proveniente de la producción de suero oral Oral dex

sometida al tratamiento fotocatalítico cumple con algunos de los parámetros críticos según la NSO.13:07.01:04 para la Calidad del Agua Potable

Los resultados anteriores realizados después del tratamiento fotocatalítico demuestran que el tratamiento propuesto podría convertirse en un método capaz de potabilizar agua como una herramienta alternativa y novedosa, realizando a la vez estudios más profundos sobre la calidad del agua sometida al tratamiento.

Cuadro N° 22. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción de suero oral Oraldex, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
SUERO ORAL ORALDEX	ANALISIS FISICO-QUIMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	41,200,000%	99.99%	10%

En el cuadro N° 22 se resume el porcentaje de contaminación que posee la muestra de agua residual control proveniente de la producción de suero oral Oraldex, comparada con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable.

Al igual que el porcentaje de disminución de la muestra de agua residual proveniente del lavado de la línea de producción sometida al tratamiento

fotocatalítico, comparada con la muestra de agua residual control y con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 ⁽²¹⁾ establecida para agua potable

5.15.5. Análisis de los parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrispport.

Cuadro N° 23: Análisis de parámetros críticos del agua residual proveniente de la producción de crema fría Artrispport, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Limite permitido por la Norma de agua Potable	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
CREMA FRIA ARTRISPORT	ANALISIS MICROBIOLÓGICOS			
	Coliformes totales	<1.1 NMP/100mL	>8.0 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	Coliformes termotolerantes	NEGATIVO	8 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	<i>Escherichia coli</i>	NEGATIVO	8 NMP/100mL	<1.1 NMP/100mL
	ANALISIS FISICO QUIMICOS			
	pH	6.5 – 8.5	7.8	6.5
	Color	15 pt-Co	129 pt-Co	4 pt-Co
	Turbidez	5 UNT	56 UNT	2.7 UNT
	Hierro total	0.1 mg/L	0.87 mg/L	0.0144 mg/L
	Manganeso total	0.1mg/L	0.5 mg/L	0.003 mg/L
	Dureza	200 mg/L	255 mg/L	125 mg/L
	Sulfatos	500 mg/L	135 mg/L	105 mg/L
	Zinc total	5 mg/L	1.95 mg/L	2.1 mg/L

En el cuadro N° 23 se muestran los resultados de los análisis microbiológicos y químicos de los parámetros críticos realizados a la muestra de agua residual de producción de crema fría artrispport antes y después del tratamiento fotocatalítico según la norma NSO 13:07.01:04 presentan un resultado menor en comparación a las muestras anteriores,

debido al procedimiento de limpieza de la maquinaria de producción de la crema.

A. Análisis de resultados antes del tratamiento fotocatalítico.

Descripción del agua residual:

El agua residual proveniente de la maquinaria de producción de crema fría Artrispot antes del tratamiento fotocatalítico presentó las mismas características de color, olor y aspecto descritas anteriormente. (Ver figura N° 28)

Análisis de resultados microbiológicos antes del tratamiento fotocatalítico:

La muestra de agua residual presentó una elevada contaminación microbiológica dando resultados por encima del límite de la norma para la calidad del agua potable, entre los parámetros analizados se encuentran:

- Los resultados de la determinación de coliformes totales, termotolerantes y *Escherichia coli* se encuentran en un 80,000% por encima de la normativa, dando a visualizar el elevado grado de contaminación que poseía la muestra de agua residual.

Esto se debió a la posible presencia de microorganismos depositados en las tuberías de drenaje de la maquinaria de producción como se discutió en secciones anteriores.

Análisis de resultados físico-químicos antes del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis físico-químicos de la muestra de agua residual proveniente del lavado de la maquinaria de producción de la crema fría artrispot antes del tratamiento fotocatalítico presentó una elevada contaminación que sobrepasaba de los límites máximos establecidos en la norma, entre los parámetros analizados están:

- pH: La determinación del pH de la muestra de agua residual se encuentra dentro del rango establecido por la norma, este parámetro no fue afectado por el proceso de limpieza de la maquinaria de producción.
- Color: La determinación del color en la muestra de agua residual se encuentra en un porcentaje de 860% por encima del límite de la norma, debido al color blanco intenso que presentaba la muestra de agua residual.
- Turbidez: La determinación de turbidez se encuentra en un porcentaje de 1,120% arriba del límite de la norma, este resultado fue elevado por las diferentes partículas sedimentables y suspendidas que contenía la muestra de agua residual.
- Hierro total: La determinación de hierro se encuentra en un porcentaje de 870% por encima de lo establecido por la norma, este resultado fue debido a la presencia de óxido férrico presente en las tuberías de drenaje.
- Manganeso total: La determinación de manganeso se encuentra en un porcentaje de 500% arriba del límite máximo permisible por la norma de agua potable, este resultado se debió a la presencia de manganeso.
- Dureza: La determinación de la dureza se encuentra en un porcentaje de 27.5% arriba del límite máximo permisible por la norma, el resultado de

este parámetro se debió a la presencia de sales que aumentan la dureza del agua residual.

- Sulfatos: El resultado de la determinación de sulfatos no excede el límite de la norma de agua potable, debido a que la muestra de agua residual no presenta sulfatos disueltos.
- Zinc: El resultado de la determinación de zinc en la muestra de agua residual no pasó del límite de la norma, la determinación de zinc presentó un resultado debido a la adición del fotocatalizador empleado en la reacción.

Los resultados de los análisis microbiológicos y químicos realizados a la muestra de agua residual de la crema fría Artrisport antes del tratamiento fotocatalítico reflejan el grado de contaminación que presenta la muestra, estos resultados de elevada contaminación determinan que el agua no es apta para el consumo humano. ⁽¹¹⁾

B. Análisis de resultados después del tratamiento fotocatalítico.

Análisis de resultados microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis microbiológicos después del tratamiento fotocatalítico reflejan la eliminación de la carga microbiana que poseía la muestra de agua residual, tanto en la determinación de las coliformes totales, termotolerantes y *Escherichia coli* en un porcentaje de 0% de contaminación microbiológica cumpliendo con lo establecido por la norma para la calidad de agua potable.

El resultado de este parámetro refleja que el tratamiento fotocatalítico es efectivo para la eliminación de microorganismos y de bacterias como la *Escherichia coli* en el agua residual, garantizando así la ausencia de microorganismos en el agua residual.

- Análisis de resultados químicos después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de los análisis químicos después del tratamiento fotocatalítico reflejan una disminución de los parámetros, obteniendo resultados menores a los límites máximos permisibles por la norma. Entre los parámetros analizados están:

- pH: La determinación del pH de la muestra del agua residual se encuentra dentro del rango establecido en la norma para la calidad del agua potable, este parámetro no fue afectado en el tratamiento fotocatalítico.
- Color: La determinación de color disminuyó en un porcentaje de 97% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando un valor menor al límite máximo permisible por la norma en un porcentaje de 73%. Debido a la oxidación de la materia orgánica coloreada en la muestra de agua residual.
- Turbidez: La determinación de turbidez disminuyó en un porcentaje de 95% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando un valor menor al límite máximo permisible por la norma en un porcentaje de 46%. Debido al efecto de absorción de las partículas de óxido de zinc generado en la reacción fotocatalítica.

- Hierro total: La determinación del hierro disminuyó en un porcentaje de 98% con respecto a la muestra de agua residual, logrando un valor menor al límite máximo permisible por la norma en un porcentaje de 87%. Debido a la reducción del hierro por las partículas de óxido de zinc en la reacción fotocatalítica.

- Manganeso total: La determinación de manganeso disminuyó en un porcentaje de 99% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, logrando obtener un valor menor al límite máximo de la norma en un porcentaje de 97%. Debido a la reducción del manganeso en el agua residual por la reacción fotocatalítica.

- Dureza: La determinación de la dureza disminuyó en un porcentaje de 51% con respecto a la muestra de agua residual no tratada, obteniendo un valor menor al límite máximo de la norma en un porcentaje de 38%. Debido a la eliminación de los iones metálicos por la reducción de los metales pesados generados por la reacción fotocatalítica.

- Sulfatos: La determinación de sulfatos en la muestra de agua residual no tratada no pasó del límite de la norma pero con la aplicación del tratamiento fotocatalítico se disminuyó el resultado de la muestra no tratada en un porcentaje de 21%, logrando obtener un valor menor al límite máximo permisible por la norma en un porcentaje de 79%. Debido al efecto de adsorción sobre las partículas de ZnO.

- Zinc: La determinación de zinc en la muestra de agua residual no tratada presentó un resultado que no pasa del límite máximo de la norma, debido a la adición del fotocatalizador en el proceso de la reacción este resultado experimentó un aumento en la determinación de zinc.

El resultado de la determinación de zinc en la muestra de agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico no pasó del límite máximo permisible por la norma, logrando un valor menor en un porcentaje de 58%.

Los resultados de los análisis microbiológicos y químicos realizados después del tratamiento fotocatalítico demuestran que éste es efectivo para la desinfección de las aguas residuales garantizando la ausencia de carga microbiana, logrando también la destrucción de todos los contaminantes orgánicos biodegradables y no biodegradables disueltos en el agua residual

El agua residual después del tratamiento fotocatalítico posee las siguientes características:

- Color: La muestra de agua residual sometida al tratamiento es incolora, debido a la destrucción de todos los contaminantes que proporcionaban tonalidad a la muestra.
- Olor: La muestra de agua residual después del tratamiento fotocatalítico no presentaba olor, el olor percibido en la muestra inicial característico a mentol y fenol ya no era perceptible.

- Aspecto: La muestra de agua residual sometida al tratamiento fotocatalítico fué inodora e incolora, debido a que ya no presentaba las diferentes partículas suspendidas y sedimentables que contenía al inicio del tratamiento.

Los resultados de los análisis microbiológicos y fisicoquímicos demuestran que el agua residual proveniente del lavado de la línea de producción de crema fría artrisport sometida al tratamiento fotocatalítico cumple con algunos de los parámetros críticos según la NSO.13:07.01:04 para la Calidad del Agua Potable

Los resultados anteriores realizados después del tratamiento fotocatalítico demuestran que el tratamiento propuesto podría convertirse en un método capaz de potabilizar agua como una herramienta alternativa y novedosa, realizando a la vez estudios más profundos sobre la calidad del agua sometida al tratamiento.

En el cuadro N° 24 se resumen en forma porcentual los resultados de los diferentes parámetros analizados, observando el grado de contaminación de la muestra de agua residual proveniente de producción de crema fría artrisport, según la NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable.

Cuadro N° 24: Análisis porcentual de parámetros críticos de la muestra de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrispport, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable
CREMA FRÍA ARTRISPORT	Coliformes totales	Presencia alta	0%	0%
	Coliformes termotolerantes	Presencia alta	0%	0%
	E. Coli	Presencia alta	0%	0%
	pH	Dentro del rango	6.5	6.5
	Color	860%	97%	73%
	Turbidez	1,120%	95%	46%
	Hierro total	870%	98%	87%
	Manganeso total	500%	99%	97%
	Dureza	27.5%	51%	38%
	Sulfatos	Por debajo del límite de la Norma	21%	79%
	Zinc	Por debajo del límite de la Norma	Dentro de la Norma (mínimo aumento)	Por debajo del límite de la Norma

Al igual que los porcentajes de la disminución de los resultados de los diferentes parámetros de la muestra de agua residual proveniente de lavado de la línea de producción sometida al tratamiento fotocatalítico, comparados con respecto a la muestra control y a la Norma de calidad NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable.

5.15.6. Determinación de fenol de agua residual proveniente de la producción crema fría artrisport antes y después del tratamiento fotocatalítico.

El resultado del análisis de fenol para una muestra de agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport antes y después del tratamiento fotocatalítico según las Normas Oficiales para la Calidad del Agua México, se encuentran en el cuadro N° 25, (Se empleó el límite de la norma mexicana debido a que no se encontró el parámetro del fenol en la NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable). ⁽²¹⁾

Cuadro N° 25. Análisis de fenol realizados al agua residual proveniente de la crema fría Artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico. (*)

Muestra de agua residual de la producción	Parámetro	Límite permitido por la Norma de agua potable (México)	Resultado antes del tratamiento fotocatalítico	Resultado después del tratamiento fotocatalítico
CREMA FRÍA ARTRISPORT	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	0.001 mg/L	122 mg/L	0.0009 mg/L

(*) Según Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 ⁽²¹⁾

A. Análisis de resultado antes del tratamiento fotocatalítico:

El resultado de la determinación de fenol en una muestra de agua residual antes del tratamiento fotocatalítico se encuentra en un porcentaje de 12,200,000% arriba de la norma, este resultado es alarmante debido a la elevada concentración de este contaminante en el agua residual.

El fenol se determinó como el contaminante para estimar el tiempo de residencia para la degradación de los contaminantes disueltos en las

muestras en estudio.

Según la normativa salvadoreña NSO. 13:07.01:04 establecida para agua potable, se considera el agua sometida al tratamiento fotocatalítico apta para el consumo humano sin la determinación del fenol debido a que no se encontró la determinación de este contaminante para la determinación de la calidad de agua potable, pero como se tenía el conocimiento de la presencia de fenol en el agua tratada se decidió realizar la determinación de este contaminante utilizando como valor máximo permisible el de normativa mexicana. (18)

B. Análisis de resultado después del tratamiento fotocatalítico:

Los resultados de la determinación de fenol obtenidos después del tratamiento fotocatalítico reflejan la degradación del fenol de la muestra de agua residual en un 99.99% en un tiempo calculado teóricamente de 22 horas de reacción. (Nota por motivos de tiempo no pudo realizarse experimentalmente la irradiación). La disminución de este parámetro de debió a la oxidación del fenol del agua residual.

Se empleó el mismo modelo matemático experimental para determinar el tiempo de residencia para la degradación de fenol utilizando como valor mínimo de concentración de fenol en el agua tratada el máximo permisible por la normativa mexicana. Se realizaron los cálculos para determinar una disminución de un porcentaje de 10% menor al máximo permisible por la norma.

Los resultados reflejan que el agua cumple con los parámetros críticos según la normativa salvadoreña y con la determinación de fenol según la normativa mexicana, con la cual se aprueba que la calidad del agua sometida al tratamiento sea apta para el consumo humano. ⁽⁵⁾

Cuadro N° 26. Análisis porcentual de la determinación de fenol realizado al agua residual proveniente de la producción de crema fría artrisport, antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Muestra de agua residual de la producción	Parámetros	Porcentaje de contaminación de la muestra control según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada comparado con la muestra control	Porcentaje de disminución de contaminación de la muestra tratada con respecto según la Norma NSO 13.49.01:06, aplicada para aguas residuales
CREMA FRÍA ARTRISPORT	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO COMPLEMENTARIO			
	Compuestos fenólicos	12.200,000%	99.99%	10%

En el cuadro N° 26 se resume el porcentaje de contaminación que posee la muestra de agua residual control proveniente de la producción de crema fría artrisport, comparada con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable.

Al igual que el porcentaje de disminución de la muestra de agua residual proveniente del lavado de la línea de producción sometida al tratamiento fotocatalítico, comparada con la muestra de agua residual control y con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 establecida para agua potable.

CAPITULO VI
CONCLUSIONES

6.0 CONCLUSIONES

1. La fotocatalisis heterogénea como parte de los procesos de oxidación avanzada es una alternativa para la degradación de contaminantes orgánicos disueltos en las muestras de agua residual de producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport obteniendo la mineralización completa de los contaminantes disueltos debido a la fotooxidación provocada por los radicales oxidrilos.
2. La cinética de las reacciones fotocatalíticas de las muestras de aguas residuales provenientes de la producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport, muestran un decaimiento en la intensidad de la banda de absorción característica lo que comprueba que los contaminantes se destruyeron con el tiempo de irradiación. Al ajustar los datos obtenidos de absorbancia y tiempo con el modelo matemático cinético de Langmuir Hinshelwood, se observó que todas las muestras presentan una cinética de primer orden y una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales.
3. Se encontró la constante de velocidad para cada una de las muestras de agua residual proveniente de la producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport, obteniendo las constantes siguientes: 0.0063 min^{-1} , 0.0073 min^{-1} y 0.0059 min^{-1} respectivamente,

4. Lo cual indica que los contaminantes orgánicos e inorgánicos se destruyeron con el tiempo de irradiación. Se observa que todas las muestras presentan una cinética de primer orden y una tendencia lineal en el comportamiento de los datos experimentales.
5. El pH del medio es un factor que limita la eficiencia de los procesos fotocatalíticos, reportando en términos generales mayores rendimientos a pH ácido; es decir que la degradación fotocatalítica es más efectiva a pH entre un rango de 5.5 y 6.5; ya que a un menor pH el ZnO se disuelve en la muestra de agua analizada, y a un pH mayor la reacción es demasiado lenta.
6. El fenol debido a su estructura molecular fue el contaminante que más tiempo necesitó para fotodegradarse razón por la cual se utilizó para estimar el tiempo de residencia total de acuerdo con la ley cinética en las muestras de agua residual en estudio, obteniendo como resultado un tiempo de 7.20 horas, estimando que al dejar bajo radiación ultravioleta visible, la suspensión con ZnO las muestras de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrispot, se han destruido todos los contaminantes orgánicos disueltos en ellas, comprobando que la fotocatalisis es efectiva para tratar muestras complejas de contaminantes.

7. Los resultados obtenidos de los parámetros críticos: físico-químicos, microbiológicos y el análisis complementario de fenol de la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual, realizados a las muestras de agua residual de producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport, cumplen con los valores máximos permisibles establecidos por la normativa, comprobando la efectividad del método fotocatalítico, y el beneficio de descargar aguas residuales libre de contaminación a un cuerpo receptor, contribuyendo en gran medida a la conservación del medio ambiente.

8. Con el tratamiento Fotocatalítico y un tiempo de irradiación de 7 horas y 20 minutos determinado por medio del cálculo matemático experimental, se logró la disminución de fenol en el agua residual a un 10% abajo del límite máximo permisible por la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.49.01:06 establecida para agua residual.

9. Los resultados obtenidos de los parámetros: químicos y microbiológicos de Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13:07.01:04 establecida para la calidad de agua potable, realizados a las muestras de agua residual de producción de jarabe de ambroxol, suero oral oraldex y crema fría artrisport, cumplen con los valores máximos permisibles establecidos por la normativa, comprobando que la

10. fotocatalisis podría convertirse en un método capaz de potabilizar agua como una herramienta alternativa y novedosa.

11. Con la aplicación del tratamiento fotocatalítico se necesitaría un tiempo de residencia teórico de 22 horas, calculado por medio del modelo matemático experimental para la estimación del tiempo de residencia para aguas residuales, empleando como valor mínimo de concentración de fenol en el agua el máximo permisible por La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

CAPITULO VII
RECOMENDACIONES

7.0. RECOMENDACIONES

1. Al laboratorio en estudio se sugiere el reemplazo del fenol por otro desinfectante para la limpieza del área y equipo de producción, que fuera menos tóxico para el ecosistema. Así como el diseño de un reactor para evaluar el desempeño del tratamiento Fotocatalítico a mayor escala para implementar este novedoso tratamiento de aguas residuales
2. Realizar esta técnica de tratamiento con la ayuda de otros oxidantes que potencialicen la velocidad de reacción y así la degradación del fenol sea más rápida, y el tiempo de residencia disminuya.
3. Utilizar esta técnica como una alternativa de tratamiento para agua residual en los laboratorios farmacéuticos, con el objetivo de obtener un estatus de calidad, que respalden así la responsabilidad social y el respeto a las regulaciones ambientales.
4. Emplear la fotocatalisis como una herramienta futura de potabilización de agua convirtiéndose en una solución a largo plazo del problema de escasez del recurso hídrico para consumo humano.

5. Que la presente investigación se emplee como base para estudios posteriores ya que podría ser la pauta para que a largo plazo permita potabilizar agua, profundizando los estudios realizando mas pruebas para el fenol.
6. Diseñar reactores fotocatalíticos a mayor escala para proporcionar un tratamiento a las aguas residuales de las industrias no solo farmacéuticas, sino también textil, agrícola, alimenticia, etc; antes de ser vertidas al cuerpo receptor para destruir los contaminantes y brindar un afluente libre de contaminación ambiental.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. Aguilar, D.y otros. 2003. Tratamiento fotocatalítico como medio de purificación para aguas contaminadas utilizando el óxido de zinc como fotocatalizador. Trabajo de graduación para optar al grado de Licenciatura en Ciencias Químicas, Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria de Occidente, Departamento de Química.
2. Alfano, O. y otros. 2001. Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea. Programa Iberoamericano para el Desarrollo de Ciencia y Tecnología (CYTED). La Plata, Ar. Ed. M. Blesa.
3. APHA, (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WPCF (Water Pollution Control Federation), 1992. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Editorial. Franson, M. 3ª. Ed. Madrid, Es.
4. Braude, E.A. 1999. Absorción de Luz Ultravioleta y Visible en la determinación de la estructura Orgánica por Métodos físicos. Nueva York, EEUU, 4ª Ed, pág: 94-131
5. Centi, G. 2000. Catálisis y Procesos para Protección Ambiental, Objetivos y Oportunidades para investigación. 6º Simposio en Catálisis de Procesos Ambientalmente Amigables. Delphia, Grecia pág. 3-4.
6. Chávez, M. 2003. Degradación fotocatalítica del fenol mediante el dióxido de titanio en suspensión acuosa. Trabajo de Graduación para optar al grado de Lic. Ciencias Químicas. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Escuela de Química.

7. Chatterjee, D. Mahata, A. 2001. Destoxificación Fotoasistida de Contaminantes Orgánicos en un Sistema de la Superficie Modificada de una Partícula semiconductor de TiO_2 . Comunicaciones de Catálisis. 2; 1-3.
8. Conferencia Internacional de Química de Coordinación (XXXVI, Mérida, México). 2005. Degradación fotocatalítica selectiva en dispersiones acuosas de ZnO. Proyecto de Investigación presentado por Méndez, E. docente del Departamento de Química de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente, Universidad de El Salvador, y las asistentes de investigación: Lemus, M. y Novoa, C.
9. Conferencia Internacional de Investigación Catalítica (IV, Heidelberg, Alemania). 2006. Aceleración fotodegradativa de compuestos orgánicos por especies aceptoras de electrones. Proyecto de investigación presentado por Méndez, E. docente del Departamento de Química de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente, Universidad de El Salvador, y las asistentes de investigación: Ramírez, V. y Peña, M.
10. CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), Norma Salvadoreña Obligatoria para Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor. NSO 13.49.01:06.
11. CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) Norma Salvadoreña Obligatoria para la Calidad de Agua Potable. NSO 13:07.01:04.
12. CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) adaptado de NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología), Nota Técnica

- 1297, 1994. Directrices para la evaluación y expresión de la incertidumbre de los resultados de las mediciones.
13. CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). 2001. Informe Científico del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. La Plata, Ar. Editorial M. Blesa.
 14. Dindar, B, y otros. 2001. Fotoreactividad inusual del ZnO irradiada por medio de luz solar concentrada. Journal de Fotoquímica y Fotobiología. A: Química. 140, páginas; 263-268.
 15. Doménech, X. y otros. 2001, Procesos Avanzados de Oxidación para la Eliminación de Contaminantes, 6ª Edición, Paris, Francia, páginas 4-25.
 16. Gálvez, J. 2001. Purificación de agua por Fotocatálisis Heterogénea. Estado de arte. IVTAN, Ed. ISBN 5-201-09540-2, Moscú, Rusia, páginas: 51-75.
 17. Glyln, H. 1999. Ingeniería Ambiental. 3 ed. Bogotá, Co. Editorial McGrawHill.
 18. Hernández, M., y otros. 1999. La fotocatalisis y sus aplicaciones. Trabajo de graduación para optar al grado de Licenciatura en Ciencias Químicas, Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Escuela de Química.
 19. MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. Reglamento Especial de Aguas Residuales. Diario Oficial. San Salvador, 1 de Junio de 2000. Tomo 347 Decreto N° 39. Páginas 21-35.
 20. MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. Reglamento Especial de Normas Técnicas de Calidad Ambiental. Diario

Oficial. San Salvador, 1 de Junio de 2000. Tomo 347 Decreto N° 40.
Páginas 36-45.

21. MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales).1994
Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud Ambiental, Agua
para Uso y Consumo Humano, Limites permisibles de Calidad y
Tratamientos a que Debe Someterse el Agua para su Potabilización.
22. MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1995.
Reglamento de Normas Oficiales para la Calidad del Agua. Venezuela.
23. MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1994.
Reglamento de Normas para la Calidad del Agua. México.
24. Polio Martínez, M.L. 2003. Estudio comparativo del efecto floculante del
quitosano y el sulfato de aluminio en el tratamiento de aguas residuales
de la industria farmacéutica y láctea. Trabajo de Graduación para optar
al grado de Lic. en Química y Farmacia. Universidad de El Salvador,
Facultad de Química y Farmacia.
25. Pulgarin. A, y otros. 2001. Interacción entre la inactivación de la *E. coli* y
los isómeros precursores de DBO de dihidroxibenceno aplicado en los
procesos fotocatalíticos en la desinfección de agua potable utilizando
TiO₂. Journal de Fotoquímica y Fotobiología, páginas 233-241.
26. Rajeshwar, K, Ibáñez, J. 1995. Aspectos Electroquímicos de
Fotocatálisis: Aplicación a escenarios para destoxificación y
desinfección. Journal de Educación Química. 72, páginas 1024-1049.

GLOSARIO ^(7,13)

Agua Residual: es el agua resultante de cualquier uso, proceso u operaciones de tipo agropecuario, doméstico e industrial, sin que forme parte de productos finales.

Aceite y grasa: sustancia química no miscible en el agua pero soluble en solventes designados en los métodos de análisis recomendados en la Norma Salvadoreña Obligatoria para Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor. NSO 13.49.01:06.

Compuestos fenólicos: son compuestos orgánicos que se clasifican como: mono, di o polihídricos dependiendo del número de grupos hidróxidos unidos al anillo aromático del benceno.

Contaminación: es la alteración de la calidad física, química, biológica y radiactiva en detrimento de la biodiversidad.

Cuerpo de agua: masa de agua estática o en movimiento permanente o intermitente como ríos, lagos, lagunas, fuentes, acuíferos, mares, embalses y otros.

Cuerpo receptor: se refiere al cuerpo de agua expuesto a recibir descargas directas o indirectas.

Descarga: agua residual vertida a un cuerpo receptor.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): cantidad de oxígeno necesaria para la estabilización biológica de la materia orgánica biodegradable.

Demanda bioquímica de oxígeno 5 (DBO₅): cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación biológica de sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua, a los 5 días.

Demanda química de oxígeno (DQO): cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de sustancias de origen inorgánico y la estabilización química de sustancias de origen orgánico presentes en el agua.

Dilución: es el efecto de disminuir la concentración de soluto presente en una solución aumentando la cantidad de disolvente.

Fotocatálisis: es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (VIS o UV) por un sólido semiconductor de banda ancha. En la región interfacial entre el sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción de los contaminantes disueltos en el medio.

Grupo coliforme total: Cuando se usa la técnica de tubos múltiples de fermentación el grupo coliforme total se define como todos los bacilos anaerobios facultativos, gram-negativos, no formadores de esporas que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas dentro de 48 horas de incubación a 35 ± 0.2 °C.

Cuando se utiliza la técnica de filtración por membranas, el grupo coliforme total se define como todas las bacterias anaerobias facultativas, gram-negativas, no formadoras de esporas que desarrollan colonias rosadas o rojas con brillo verde metálico en 24 horas de incubación a 35 ± 0.5 °C.

Cuando se usa la técnica del sustrato cromogénico, el grupo coliforme total se define como toda bacteria que posee la enzima B_d-galactosidasa, la cual

hidroliza al sustrato cromogénico produciendo un color característico según indicador utilizado.

Grupo coliforme fecal: se llaman bacterias coliformes termotolerantes y son bacterias que tienen las mismas propiedades de los coliformes totales. A 44 ± 0.2 °C en 24 horas producen gas en medio EC, colonias azules en medio m-FCBROTH y colonias rosadas o rojas con brillo verde metálico en medio m-ENDO BROTH MF.

Industria: se considera la instalación industrial y sus anexos y dependencias, ya sean cubiertas o descubiertas, que se dediquen a la manipulación, elaboración o transformación de productos naturales o artificiales mediante tratamiento físico, químico, biológico y otros, utilizando o no maquinaria.

Materia flotante: sustancias que permanecen temporal o permanentemente en la superficie del cuerpo de agua limitando su uso.

Parámetro: aquella característica que puede ser sometida a medición.

Radiactividad: es la propiedad de determinados elementos químicos (elementos radiactivos) de descomponerse en forma espontánea, liberando energía en forma continua de radiación nuclear: alfa, beta y gamma.

Responsable de la descarga: persona natural o jurídica que vierte las aguas residuales a un cuerpo receptor.

Sólidos sedimentables: materia que se deposita por la acción de la gravedad en el fondo de cualquier recipiente o cuerpo receptor que contenga agua.

Sólidos totales o residuo: cantidad de materia sólida que permanece como residuo, posterior a la evaporación total del agua.

Sólidos suspendidos: son los sólidos no solubles que representan la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos totales disueltos.

Tratamiento de aguas residuales: es cualquier proceso físico, químico o biológico, definido para depurar las condiciones de las aguas residuales a través de operaciones, de procesos unitarios preliminares, primarios, secundarios o avanzados a fin de cumplir con las normas establecidas.

Turbiedad; turbidez: reducción de la transparencia de una muestra debido a la presencia de partículas extrañas. Se expresa en NTU.

Vertido: sinónimo de agua residual.

Valores máximos permisibles: son los valores, rangos y concentraciones de los parámetros establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria para Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor. NSO 13.49.01:06, que debe cumplir el responsable de cada descarga.

ANEXO Nº 1



Figura Nº 29: Disminución del tamaño de partículas de ZnO en el ultrasonido

ANEXO Nº 2



Figura Nº 30: Irradiación de luz ultravioleta utilizando una lámpara de arco de Xenón de alta presión de 150 Watts

ANEXO Nº 3



Figura Nº 31: Toma de alícuotas de los diferentes intervalos de tiempo establecidos.

ANEXO Nº 4



Figura N° 32: Toma de espectros UV-VIS en espectrofotómetro Cary 50 de las alícuotas centrifugadas.

ANEXO Nº 5

HOJAS DE RESULTADOS DE ANALISIS

Santa Ana, 02 de octubre de 2008

Resultado de análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, de la muestra de agua residual

de producción de Jarabe de ambroxol, del laboratorio farmacéutico en estudio:

Fecha de muestreo: 02-10-2008

Toma de muestra: Drenaje de maquinaria

Hora de muestreo: 9:30 a.m.

Temperatura de muestra: 3.6°C

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS				
PARAMETRO:	ANTES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO		DESPUÉS DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO	
	Absorbancia	Concentración	Absorbancia	Concentración
HIERRO	0.4600	0.4500	0.0000	0.0130
MANGANESO	0.7298	0.7502	0.0000	0.0270
ZINC	1.0738	1.3405	1.9389	2.4014
SULFATOS	7.1050	355.6000	2.0500	125.1700
DUREZA	125.20	250.40	19.70	39.4000
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS				
PARAMETRO:	ANTES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO		DESPUÉS DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO	
	Tubos contaminados	valor	Tubos contaminados	Valor
Coliformes totales	5	>8.0	0	<1.1
Coliformes termotolerantes y Escherichea coli	5	>8.0	0	<1.1

F. _____

Msc. Eric Méndez

Firma del Asesor

F. _____

Jaime Zaldaña

Firma de Analista

**Km 64 Carretera Antigua A San Salvador, Plantel El Molino, Santa Ana Tel.
Conmutador: 2456-2600 Ext. 4652, Tel Directo Lab.2456-2652 Fax:2456-2612**

Figura N° 33: Análisis fisico químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de jarabe de ambroxol antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.

Santa Ana, 03 Octubre de 2008.

Resultado de análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, de la muestra de suero oral oraldex, del laboratorio farmacéutico en estudio:

Fecha de muestreo: 02-10-2008

Toma de muestra: Drenaje de maquinaria

Hora de muestreo: 2:30 p.m.

Temperatura de muestra: 3.8°C

ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICOS				
PARAMETRO:	ANTES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO		DESPUES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO	
	Absorbancia	Concentración	Absorbancia	Concentración
HIERRO	0.5142	0.5000	0.0020	0.0150
MANGANESO	0.6798	0.7071	0.0000	0.0271
ZINC	0.9978	1.2500	2.0429	2.4980
SULFATOS	2.4938	124.6700	1.4803	74.0000
DUREZA	143.67	287.34	22.69	45.38
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS				
PARAMETRO:	ANTES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO		DESPUES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO	
	Tubos contaminados	Valor	Tubos contaminados	Valor
Coliformes totales	4	>8.0	0	<1.1
Coliformes termotolerantes y Escherichea coli	3	4.6	0	<1.1

F. _____

Msc. Eric Méndez

Firma del Asesor

F. _____

Jaime Zaldaña

Firma de Analista

**Km 64 Carretera Antigua A San Salvador, Plantel El Molino, Santa Ana Tel.
Conmutador: 2456-2600 Ext. 4652, Tel Directo Lab.2456-2652 Fax:2456-2612**

Figura N° 34: Análisis físico-químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de suero oral Oraldex antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.

Santa Ana, 03 Octubre de 2008.

Resultado de análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, de la muestra de crema fría Artrispot, del laboratorio farmacéutico en estudio:

Fecha de muestreo: 02-10-2008

Toma de muestra: Drenaje de maquinaria

Hora de muestreo: 5:30 p.m.

Temperatura de muestra: 3.2°C

ANALISIS FISICO QUIMICOS				
PARAMETRO:	ANTES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO		DESPUÉS DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO	
	Absorbancia	Concentración	Absorbancia	Concentración
HIERRO	0.9051	0.8702	0.0020	0.0144
MANGANESO	0.4773	0.5000	0.0000	0.0270
ZINC	1.5699	1.9500	1.6925	2.1000
SULFATOS	2.7010	135.0300	2.1004	105.0100
DUREZA	127.50	255.00	62.50	125.00
ANALISIS MICROBIOLÓGICOS				
PARAMETRO:	ANTES DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO		DESPUÉS DEL TRATAMIENTO FOTOCATALITICO	
	Tubos contaminados	Valor	Tubos contaminados	Valor
Coliformes totales	5	>8.0	0	<1.1
Coliformes termotolerantes y Escherichea coli	4	8	0	<1.1

F. _____

Msc. Eric Méndez

Firma del Asesor

F. _____

Jaime Zaldaña

Firma de Analista

**Km 64 Carretera Antigua A San Salvador, Plantel El Molino, Santa Ana Tel.
Conmutador: 2456-2600 Ext. 4652, Tel Directo Lab.2456-2652 Fax:2456-2612**

Figura N° 35: Análisis físico-químicos y microbiológicos de la muestra de agua residual de producción de crema fría Artispot antes y después del tratamiento fotocatalítico según NSO 13:07.01:04 para la calidad de agua potable.

ANEXO Nº 6

CINÉTICA DE DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE FENOL

12ppm, a pH 6.0

TABLA N° 4: CINÉTICA DE DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE FENOL
12 ppm, a pH 6.0

Absorbancia	Tiempo (min)	$\text{Ln} ((A_0 - A_\infty)/(A_f - A_\infty))$
0,191	0	0,00
0,170	30	0,12
0,140	60	0,33
0,104	90	0,66
0,079	120	0,97
0,068	150	1,15
0,057	180	1,36
0,046	210	1,63
0,041	240	1,76
0,033	270	2,06
0,028	300	2,33
0,027	330	2,40
0,024	360	2,55
0,021	390	2,82

ANEXO N° 7

DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE FENOL 12 ppm. pH 6

TABLA Nº 5: DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE FENOL 12 ppm. pH 6

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)
0	0,191	12,38
10	0,180	11,71
20	0,176	11,40
30	0,170	11,05
40	0,160	10,39
50	0,151	9,78
60	0,140	9,11
70	0,130	8,46
80	0,121	7,83
90	0,104	6,75
120	0,079	5,11
150	0,068	4,39
180	0,057	3,67
210	0,046	2,97
240	0,041	2,68
270	0,033	2,16
300	0,028	1,81
330	0,027	1,73
360	0,024	1,59
390	0,021	1,37
405	0,010	0,67
435	0.0008	0.5

ANEXO Nº 8
EJEMPLOS DE APLICACIÓN

EJEMPLO DE APLICACIÓN Nº 1

Calculo de concentración de fenol en partes por millón (PPM)

Según la ley de Beer:

$$A = \epsilon b C$$

Donde

A = Absorbancia.

ϵ = Epsilon de fenol a longitud de onda de 270 nm = $1450 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (3)

b = Espesor de la celda: 1 cm.

C_0 = Concentración de la muestra (Molar)

PMG = peso molecular gramo de fenol = 94.11g/mol

Despejando concentración (C) tenemos:

$$C = \frac{A}{\epsilon b}$$

Sustituyendo:

$$C_0 = \frac{0.191}{(1450 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1} (1 \text{ cm}))}$$

$$C_0 = 0.0001317 \text{ M}$$

Convirtiendo la concentración molar a ppm

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{masa (gramos de soluto)}}{(\text{PMG (g / mol)} \times \text{volumen (L)})}$$

$$\frac{\text{masa (mg)}}{\text{volumen (L)}} = M \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \times \text{PMG} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right)$$

$$\frac{\text{masa (mg)}}{\text{volumen (L)}} = 0.0001317 \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \times 94.11 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right)$$

$$C_0 = \frac{12.4mg}{L} \approx 12.4 ppm$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN Nº 2

Calculo del error máximo propagado posible (EMPP) de la conversión de la concentración Molar a ppm (Δppm):

$$(\Delta ppm)^2 = \left(\frac{\partial ppm}{\partial M}\right)^2 (\Delta M)^2 + \left(\frac{\partial ppm}{\partial PMG}\right)^2 (\Delta PMG)^2$$

Donde:

$$PMG = 94.11 \frac{g}{mol} \qquad (\Delta PMG) = 0.004 \frac{g}{mol}$$
$$M = 0.0001317 \frac{mol}{L} \qquad (\Delta M) = 7 \times 10^{-6} \frac{mol}{L}$$

Sustituyendo:

$$\frac{masa (mg)}{volumen (L)} = M \left(\frac{mol}{L}\right) \times PMG \left(\frac{g}{mol}\right) \times \left(\frac{1000 mg}{1g}\right)$$

$$(\Delta ppm)^2 = (M \times 1000)^2 (\Delta PMG)^2 + (PMG \times 1000)^2 (\Delta M)^2$$

$$(\Delta ppm)^2 = \left(0.0001317 \frac{mol}{L} \times 1000 \frac{mg}{1g}\right)^2 \left(0.004 \frac{g}{mol}\right)^2 + \left(94.11 \frac{g}{mol} \times 1000 \frac{mg}{1g}\right)^2 \left(7 \times 10^{-6} \frac{mol}{L}\right)^2$$

$$(\Delta ppm)^2 = (0.01734489)^2 (0.004)^2 + (8856692100)^2 \left(7 \times 10^{-6} \frac{mol}{L}\right)^2$$

$$(\Delta ppm)^2 = 2.78 \times 10^{-7} \frac{mg}{L} + 0.433977912 \frac{mg}{L}$$

$$\sqrt{(\Delta ppm)^2} = \sqrt{0.433978189 \frac{mg}{L}}$$

$$\Delta ppm = 0.6587 \frac{mg}{L}$$

$$\Delta ppm = 0.7 ppm$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN Nº 3

Calculo del error máximo propagado posible (EMPP) de la

concentración inicial:
$$C = \frac{A}{\varepsilon b}$$

$$(\Delta Co)^2 = \left(\frac{\partial Co}{\partial A}\right)^2 (\Delta A)^2 + \left(\frac{\partial Co}{\partial \varepsilon}\right)^2 (\Delta \varepsilon)^2 + \left(\frac{\partial Co}{\partial b}\right)^2 (\Delta b)^2$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= 0.191 \text{ ua} & (\Delta A) &= 0.001 \text{ ua} \\ b &= 1 \text{ cm} & (\Delta b) &= 0.05 \text{ cm} \\ \varepsilon &= 1450 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1} & (\Delta \varepsilon) &= 1 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

Sustituyendo:

$$(\Delta Co)^2 = \left(\frac{1}{\varepsilon b}\right)^2 (\Delta A)^2 + \left(\frac{A}{b} \times -\frac{1}{(\varepsilon)^2}\right)^2 (\Delta \varepsilon)^2 + \left(\frac{A}{\varepsilon} \times -\frac{1}{(b)^2}\right)^2 (\Delta b)^2$$

$$\begin{aligned} (\Delta Co)^2 &= \left(\frac{1}{(1450 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1})(1 \text{ cm})}\right)^2 (0.001 \text{ ua})^2 + \left(\frac{0.191 \text{ ua}}{1 \text{ cm}} \times -\frac{1}{(1450)^2}\right)^2 (1 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1})^2 \\ &+ \left(\frac{0.191 \text{ ua}}{1450 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}} \times -\frac{1}{(1)^2}\right)^2 (0.05 \text{ cm})^2 \end{aligned}$$

$$(\Delta Co)^2 = 4.756 \times 10^{-7} (0.001)^2 + 8.25 \times 10^{-15} (1)^2 + 1.74 \times 10^{-8} (0.05)^2$$

$$(\Delta Co)^2 = 4.75 \times 10^{-13} + 8.25 \times 10^{-15} + 4.34 \times 10^{-11}$$

$$\sqrt{(\Delta Co)^2} = \sqrt{4.38 \times 10^{-11}}$$

$$\Delta Co = 6.62 \times 10^{-6} \text{ M}$$

$$\Delta Co = 0.000007 \text{ M}$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN Nº 4

Calculo del error máximo propagado posible (EMPP) del PMG del fenol:

Sustituyendo:

$$C_6H_5O \left\{ \begin{array}{l} C = (12.0107 \pm 0.0001) \text{ g/mol} \\ H = (1.0079 \pm 0.0001) \text{ g/mol} \\ O = (15.9994 \pm 0.0001) \text{ g/mol} \end{array} \right\}$$

$$PMG = 6 \text{ peso atómico}(g)C + 6 \text{ peso atómico}(g)H + 1 \text{ peso atómico}(g)O$$

$$\begin{aligned} (\Delta PMG)^2 &= \left(\frac{\partial PMG}{\partial \text{peso atómico}(g)C} \right)^2 (\Delta \text{peso atómico}(g)C)^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial PMG}{\partial \text{peso atómico}(g)H} \right)^2 (\Delta \text{peso atómico}(g)H)^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial PMG}{\partial \text{peso atómico}(g)O} \right)^2 (\Delta \text{peso atómico}(g)O)^2 + \end{aligned}$$

$$(\Delta PMG)^2 = 6(-0.001)^2 + 6(0.001)^2 + (0.001)^2$$

$$(\Delta PMG)^2 = 6 \times 10^{-6} + 6 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-6}$$

$$\sqrt{(\Delta PMG)^2} = \sqrt{1.3 \times 10^{-5}}$$

$$\Delta PMG = 3.6 \times 10^{-3} \text{ g/mol}$$

$$\Delta PMG = 0.004 \text{ g/mol}$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN Nº 5

Calculo del error máximo propagado posible (EMPP) del tiempo de residencia₍₁₂₎:

Formula de la Ley de Beer:

$$A = \epsilon b C$$

Despejando la concentración:

$$C = \frac{A}{\epsilon b}$$

Donde:

A = Absorbancia

ϵ = Epsilon de fenol a longitud de onda de 270 nm = 1450 M⁻¹ cm⁻¹₍₃₎

b = Espesor de la celda: 1 cm

C = Concentración de la muestra (ppm)

Ecuación general de la Teoria de propagación de error:

E.M.P.P. $f = f(x, y, z, \dots)$

$$(\Delta f)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots$$

Donde:

$C_0 = 12.4 \text{ ppm}$

$(\Delta C_0) = 0.7 \text{ ppm}$

$C = 0.5 \text{ ppm}$

$(\Delta C) = 0.1 \text{ ppm}$

$k = 0.0074 \text{ min}^{-1}$

$(\Delta k) = 0.0002 \text{ min}^{-1}$

Sustituyendo:

$$t = \frac{\text{Ln} \left[\frac{C_0}{C} \right]}{k}$$

$$(\Delta t)^2 = \left(\frac{\partial t}{\partial C_0} \right)^2 (\Delta C_0)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial C} \right)^2 (\Delta C)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial k} \right)^2 (\Delta k)^2$$

$$(\Delta t)^2 = \left(\frac{1}{kC_0} \right)^2 (\Delta C_0)^2 + \left(-\frac{1}{kC} \right)^2 (\Delta C)^2 + \left(-\frac{\text{Ln} \frac{C_0}{C}}{k^2} \right)^2 (\Delta k)^2$$

$$(\Delta t)^2 = \left(\frac{1}{(0.0074 \text{ min}^{-1})(12.4 \text{ ppm})} \right)^2 (0.7 \text{ ppm})^2 + \left(-\frac{1}{(0.0074 \text{ min}^{-1})(0.5 \text{ ppm})} \right)^2 (0.1 \text{ ppm})^2$$

$$+ \left(-\frac{\text{Ln} \frac{12.4 \text{ ppm}}{0.5 \text{ ppm}}}{(0.0074 \text{ min}^{-1})^2} \right)^2 (0.0002 \text{ min}^{-1})^2$$

$$(\Delta t)^2 = 118.76629(0.7)^2 + 73046.01899(0.1)^2 + 3438044065(0.0002)^2$$

$$(\Delta t)^2 = 58.1954821 + 730.4601899 + 137.5217626$$

$$(\Delta t)^2 = 926.1774346$$

$$\sqrt{(\Delta t)^2} = \sqrt{926.1774346}$$

$$\Delta t = 30.43 \text{ min}$$