



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN AGUAS RESIDUALES
GENERADAS EN UNA GRANJA AVÍCOLA, UTILIZANDO FOTOCATÁLISIS
HETEROGÉNEA COMO UNA ALTERNATIVA**

Gerson Xavier Velásquez Vásquez

Asesorado por el Ing. Francisco Khalil de León Barrios

Guatemala, julio de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN AGUAS RESIDUALES
GENERADAS EN UNA GRANJA AVÍCOLA, UTILIZANDO FOTOCATÁLISIS
HETEROGÉNEA COMO UNA ALTERNATIVA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

GERSON XAVIER VELÁSQUEZ VÁSQUEZ

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO KHALIL DE LEÓN BARRIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JULIO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Eduardo Edmundo Monroy Benítez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN UNA GRANJA AVÍCOLA, UTILIZANDO FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA COMO UNA ALTERNATIVA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 30 de julio de 2015.



Gerson Xavier Velásquez Vásquez

Guatemala, marzo de 2016

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela Ingeniería Química
Presente

Por medio de la presente, hago constar que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación del estudiante: **Gerson Xavier Velásquez Vásquez**, con carné número: 200511743, titulado **“REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN UNA GRANJA AVÍCOLA, UTILIZANDO FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA COMO UNA ALTERNATIVA”**.

Habiendo encontrado dicho informe apto para ser presentado ante usted, extiendo la presente para que se continúe con los trámites respectivos.

Agradeciendo la atención que se sirva dar a la presente me suscribo.

Atentamente,



Ing. Francisco Khalil de León Barrios

Ingeniero Químico Colegiado No. 858

Ing. Francisco Khalil de León Barrios
Ingeniero Químico
Colegiado No. 858



Guatemala, 16 de mayo de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.029.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **016-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Gerson Xavier Velásquez Vásquez**.
Identificado con número de carné: **2005-11743**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

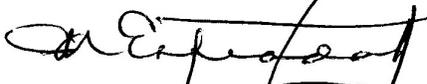
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN AGUAS RESIDUALES
GENERADAS EN UNA GRANJA AVÍCOLA, UTILIZANDO FOTOCATÁLISIS
HETEROGÉNEA COMO UNA ALTERNATIVA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Francisco Khalil de León Barrios**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERMA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.041.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **GERSON XAVIER VELÁSQUEZ VÁSQUEZ** titulado: **"REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN UNA GRANJA AVÍCOLA, UTILIZANDO FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA COMO UNA ALTERNATIVA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Dav
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, julio 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 341.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES EN AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN UNA GRANJA AVÍCOLA, UTILIZANDO FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA COMO UNA ALTERNATIVA**, presentado por el estudiante universitario: **Gerson Xavier Velásquez Vásquez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, julio de 2016

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- | | |
|---------------------|--|
| Dios | Por ser el centro de todo y por derramar su amor incondicional en mi vida. |
| Mis padres | Francisco Velásquez y Gloria Vásquez, por el esfuerzo, ejemplo y amor brindados. |
| Mis hermanas | Leslie y Nancy Velásquez, por el apoyo y amor brindados. |

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por el orgullo de pertenecer a tan prestigiosa casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas para desarrollarme como profesional.
Mis amigos	Estuardo Toledo, William Villegaz, Estuardo Aguilar, Izael Pott, por su apoyo durante la etapa de formación profesional.
Ing. Khalil de León	Por su apoyo incondicional y por ayudarme en mi formación profesional

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis.....	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Aguas residuales	5
2.1.1. Importancia del control de aguas residuales.....	6
2.1.2. Clasificación de las aguas residuales	6
2.1.3. Tipos de contaminantes presentes en aguas residuales	7
2.2. Aguas residuales industriales	9
2.2.1. Procedencia de la contaminación en aguas industriales.....	9
2.2.2. Tipos de vertidos industriales	10
2.3. Procesos de oxidación avanzada	11
2.3.1. Ventajas de las tecnologías avanzadas de oxidación	13
2.3.2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada	14

2.4.	Fotocatálisis heterogénea	15
2.5.	Desinfección de aguas residuales.....	17
2.5.1.	Tipos de microorganismos a eliminar	18
2.5.2.	Mecanismos de desinfección y reinfección	19
2.6.	Desinfección de agua por fotocatalisis heterogénea	21
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.	Variables	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	23
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	24
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	24
3.5.	Técnica cuantitativa.....	25
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	26
3.6.1.	Procedimiento	26
3.6.2.	Ordenamiento de la información	27
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	29
3.8.	Análisis estadístico.....	30
3.8.1.	Diseño experimental.....	30
3.8.2.	Análisis de hipótesis	32
4.	RESULTADOS.....	33
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	35
	CONCLUSIONES.....	39
	RECOMENDACIONES.....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	APÉNDICES	45

ANEXOS 59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Procesos en la interfaz semiconductor-electrolito 16
2. Remoción de coliformes fecales en cada uno de los tratamientos..... 34

TABLAS

- I. Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, sin añadir catalizador (control) 27
- II. Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, agregando 500 ppm de TiO_2 27
- III. Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, agregando 750 ppm de TiO_2 28
- IV. Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, agregando 1 000 ppm de TiO_2 28
- V. Arreglo para tratamientos con una réplica..... 29
- VI. Media aritmética para cada tratamiento. 29
- VII. Cuadrado latino 3 x 3 31
- VIII. Análisis de varianza del diseño del cuadrado latino 31
- IX. Cantidad de coliformes presentes inicialmente y a diferentes tiempos de irradiación de luz UV sin catalizador (control)..... 33
- X. Cantidad de coliformes presentes a diferentes tiempos de irradiación de luz UV con diferentes cantidades de catalizador 33
- XI. Porcentaje de remoción de coliformes fecales en cada tratamiento ... 34

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
H₁	Hipótesis alternativa
H₀	Hipótesis nula
λ	Longitud de onda
μ	Media aritmética
mL	Mililitro
mm	Milímetro
min	Minuto
nm	Nanómetro
α	Nivel de confianza
NMP	Número más probable
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de hidrógeno
UV	Ultravioleta

GLOSARIO

Catalizador	Sustancia que hace más rápida o más lenta la velocidad de una reacción sin participar en ella.
DNA	Ácido desoxirribonucleico, es un ácido nucleico que contiene las instrucciones genéticas usadas en el desarrollo y funcionamiento de todos los organismos vivos conocidos y algunos virus, y es responsable de su transmisión hereditaria.
Efluente	Líquido residual descargado por un ente generador.
Eutrofización	Proceso natural que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas.
Fotocatálisis	Reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato.
Fotólisis	Proceso que involucra la disociación de moléculas orgánicas complejas por efecto de la luz.
Oxidación	Reacción química donde un elemento cede electrones.

Patógeno	Agente que puede producir enfermedad o daño a la biología de un huésped, sea humano, animal o vegetal.
Polución	Contaminación del medio ambiente, en especial del aire o del agua, producida por los residuos procedentes de la actividad humana o de procesos industriales o biológicos.
Punto isoelectrico	Es el pH al que una molécula tiene carga neta cero.
Reducción	Es el proceso electroquímico por el cual un átomo o un ion gana electrones.

RESUMEN

Se evaluó la eficacia del proceso de fotocátalisis heterogénea para la remoción de coliformes fecales en una muestra tomada de la descarga de agua residual de una granja avícola, para determinar si es viable la implementación del proceso como una etapa más del tratamiento que se aplica a las descargas en dicha granja avícola.

Se trabajó la muestra tomada, a nivel laboratorio, empleando un fotorreactor tipo *batch* con agitación continua y una lámpara de luz UV capaz de emitir radiación UV-A con longitud de onda de 360 nm. Como fotocatalizador para el proceso de fotocátalisis heterogénea, se empleó dióxido de titanio.

Se fue tomando 100 mL de la muestra y variando la cantidad de catalizador y tiempo de irradiación de luz UV, y se analizó la cantidad de coliformes fecales presente en cada una de las muestras tomadas.

Se determinó que la mayor eficiencia del proceso se logró con una cantidad de 1 000 ppm de catalizador, logrando una remoción de coliformes fecales del 51,3 %.

OBJETIVOS

General

Evaluar la efectividad del proceso de fotocatalisis heterogénea para la remoción de coliformes fecales en aguas residuales.

Específicos

1. Determinar el efecto que tiene el óxido de titanio (TiO_2) en el proceso de fotocatalisis heterogénea, comparándolo con el proceso de fotólisis.
2. Determinar el porcentaje de remoción de coliformes que se logra con el proceso de fotocatalisis heterogénea.
3. Determinar la cantidad de óxido de titanio con la que se logra la mejor remoción, para las aguas analizadas y las condiciones iniciales establecidas.

Hipótesis

Con la fotocatalisis heterogénea utilizando óxido de titanio (TiO_2) como catalizador, irradiado con luz UV, logra la remoción de los coliformes fecales en las aguas residuales generadas, determinar el tiempo y la cantidad de catalizador que logran la máxima eficiencia.

Hipótesis nula

H_0 : La remoción de coliformes fecales por fotocatalisis heterogénea no se ve afectada significativamente por la cantidad de catalizador agregada, ni por el tiempo de irradiación de luz UV.

$$\mu_1 = \mu_2$$

Hipótesis alternativa

H_1 : La remoción de coliformes fecales por fotocatalisis heterogénea se ve afectada significativamente por la cantidad de catalizador agregada y por el tiempo de irradiación de luz UV.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

INTRODUCCIÓN

Gran parte de la responsabilidad del deterioro ambiental lo tienen las empresas que utilizan agua en sus procesos productivos, ya que la mayoría de veces vierten las descargas en los cuerpos de agua, causando un deterioro a la calidad haciendo que no sean aptas para su reutilización.

Estas aguas contaminadas pueden ser nocivas para la salud, pues pueden ser el vehículo de enfermedades infecciosas como la fiebre tifoidea, fiebres paratifoideas, la disentería bacteriana, el cólera, la amebiasis, la esquistosomiasis, la hepatitis infecciosa y la poliomielitis.

En países en vías de desarrollo la tecnología de desinfección de las aguas es ineficiente, la única forma utilizada para purificar el agua es por medio de la cloración, algunos estudios han confirmado en el agua potable obtenida por el uso de la cloración la existencia de subproductos que se generan por la interacción de la materia orgánica y el cloro, principalmente trihalometanos, ácidos haloacéticos y haloacetónitrilos dañinos para la salud, pues pueden causar mutaciones, cánceres y disfunción hormonal.

En las últimas décadas se ha realizado una extensa investigación de las llamadas tecnologías avanzadas de oxidación como alternativa para la desinfección del agua, una de ellas es la fotocatalisis como una etapa en una serie de tratamientos, pues esta degrada la materia orgánica evitando la formación de compuestos halogenados si posteriormente se aplica la cloración, siendo un proceso cuyo costo/beneficio es alto, ya que no requiere de un gasto elevado en reactivos ni de mucha energía como otros procesos.

La granja avícola evaluada, actualmente tiene problemas con el tratamiento aplicado a las descargas, al no lograrse los resultados deseados y no conseguir una completa inactivación de los coliformes, incumple con los límites máximos permisibles de las distintas etapas establecidas en el *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodo*. Acuerdo Gubernativo número 236-2006.

La descarga se realiza a un cuerpo receptor, lo que hace que sea de gran importancia una buena desinfección, por ende los microorganismos que contienen estas aguas contaminadas causan efectos negativos al medio ambiente y el recurso hídrico, reduciendo el nivel de oxígeno y descomponiendo aeróbicamente las bacterias contenidas, lo que ocasiona la muerte de los peces y otras formas de vida, además de transmitir enfermedades infecciosas que representan un serio problema de salud pública.

Tomando en cuenta estas razones, se propuso evaluar el proceso de fotocátalisis heterogénea para la desinfección del efluente que produce la granja avícola, porque este proceso además de destruir una gran variedad de contaminantes, no tiene efectos negativos en el medio ambiente, evita la formación de compuestos halogenados peligrosos, no es una técnica cara y parece actuar sobre todos los tipos de bacterias.

1. ANTECEDENTES

El Estado de Guatemala está obligado a garantizar la protección y mejoramiento del medio ambiente para mantener el equilibrio ecológico, al aceptar ser parte de los programas mundiales para el cuidado y preservación del mismo, en la conferencia de las Naciones Unidas que se llevó a cabo en Estocolmo, Suecia, en 1972, cuyo objetivo primordial fue establecer principios comunes, que sirvieran de guía a los pueblos del mundo para proteger y preservar el medio humano.

Pese a que el país se comprometió a cumplir los acuerdos y recomendaciones contenidos en la declaración de Estocolmo, pasaron 14 años en los que únicamente se entregaron anteproyectos, hasta el 6 de marzo de 1986, se entregó el último anteproyecto al Congreso de la República, que fue aprobado hasta el mes de diciembre del mismo año, dando lugar a la emisión de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, Decreto número 68-86, y la creación del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), entidad específica para el logro de estos propósitos.

En 2006 el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) emitió el reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, Acuerdo Gubernativo 236-2006, que tiene como objetivo prevenir, controlar y determinar los niveles de contaminación de los recursos hídricos, así como los requisitos que deben de cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales.

El óxido de titanio (TiO_2) en polvo desde la antigüedad ha sido usado comúnmente como pigmento blanco, ya que es barato, químicamente estable y además inofensivo, pero es activo bajo irradiación de luz UV, induciendo reacciones químicas. La fotoactividad que posee el óxido de titanio (TiO_2) ha sido motivo de diversos estudios científicos casi desde el principio del siglo XX.

El campo de la fotocatalisis heterogénea se ha expandido rápidamente durante las últimas 4 décadas, sufriendo una serie de desarrollos especialmente en el área de energía y medio ambiente; la contaminación del medio ambiente, incluidos el agua, el aire y el suelo, se ha convertido en un problema muy serio, ha habido muchos reportes desde la década de 1970, en los que se ha estudiado la fotocatalisis con óxido de titanio (TiO_2), como alternativa de limpieza de contaminantes.

Históricamente en el campo de la investigación, el interés en la fotocatalisis heterogénea puede ser referido a 1972 cuando Fujishima y Honda descubrieron la separación fotoquímica del agua en hidrógeno y oxígeno en presencia de óxido de titanio (TiO_2), a partir de esto hubo muchas investigaciones al respecto, la primera publicación sobre la purificación de agua por fotocatalisis se debe a Carey en el año 1976 en que el proceso fue utilizado para la degradación de contaminantes.

En la década de los 80, se llevaron a cabo varios estudios en los que se demostró la destrucción de compuestos nocivos en agua y aire, utilizando óxido de titanio (TiO_2) en polvo como un método potencial para la purificación de agua residual y aire contaminado. A pesar de que en los 80 se desarrollaron muchos estudios, la fotocatalisis con óxido de titanio (TiO_2), no pudo ser llevada a una etapa en la que se considerara una tecnología industrial.

La fotocatalisis con óxido de titanio (TiO_2) se convirtió en una tecnología práctica a mediados de la década de los 90, en la cual se realizaron una gran cantidad de estudios en los que se determinaron los alcances y limitaciones del proceso, lo que generó una serie de cuestionamientos si en realidad había posibilidad real de aplicar el proceso. Hoy en día se siguen llevando a cabo investigaciones, que toman en cuenta de forma realista limitaciones encontradas, por lo que se trata de identificar aplicaciones concretas con las que la tecnología resulte viable y competitiva.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas residuales

El término aguas residuales es utilizado para denominar al tipo de agua que se encuentra contaminada con materia fecal y orina de seres humanos o de animales, además pueden contener otras sustancias residuales provenientes del ámbito doméstico, industrial, agua de lluvia y la infiltración de agua en el terreno. Su importancia es tal, que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo. Como consecuencia de la amenaza que suponen para el medio ambiente y para la salud, las aguas residuales demandan sistemas de tratamiento para liberarlas de sustancias altamente contaminantes.

Esto hace que sea importante tratar cuidadosamente las aguas residuales para proteger la salud pública como también para proteger el medio natural. Por lo que se deberá determinar su composición, procedimiento que es denominado caracterización. A través de esta, se establecerán los elementos biológicos y químicos presentes, con estos datos se diseñan plantas para darle tratamiento.

En la actualidad aún existen muchos pueblos y comunidades en el país que vierten sus aguas residuales directamente a los ríos, sin darle antes un tratamiento adecuado. Esta conducta ha provocado que la mayoría de los seres vivos que vivían en esos ríos hayan desaparecido. Por lo que el objetivo final de llevar a cabo el tratamiento, es que el agua regrese al medio ambiente de manera depurada y libre de todo agente contaminante.

2.1.1. Importancia del control de aguas residuales

Las aguas residuales han de ser sistemáticamente analizadas y controladas, debido a su posible incidencia negativa sobre el medio ambiente y la necesidad ulterior de su depuración antes de su regreso al recurso hídrico.

Se intentaría evitar de este modo, el alto grado de polución provocado por estas aguas residuales. Existen regulaciones y normativas que imponen un control de emisiones encaminado a la preservación del cada vez más degradado medio ambiente.

2.1.2. Clasificación de las aguas residuales

Las aguas residuales se clasifican en función de su origen y pueden ser:

- Aguas residuales urbanas

La generación de aguas residuales es consecuencia inevitable de las actividades humanas, ya que dichas actividades modifican las características de las aguas de partida, contaminándolas e invalidando su posterior aplicación para otros usos.

- Aguas residuales industriales

Estas aguas se generan en actividades industriales que descargan sus vertidos a la red de alcantarillado municipal y presentan una composición muy variable dependiendo de cada tipo de industria.

- Aguas de escorrentía pluvial

Las aguas de lluvia son recogidas por el mismo sistema de alcantarillado que se emplea para la recogida y conducción de las aguas residuales domésticas e industriales.

2.1.3. Tipos de contaminantes presentes en aguas residuales

Entre los contaminantes que pueden contener las aguas residuales se encuentra la materia orgánica en suspensión y disuelta, nitrógeno, fósforo, cloruro de sodio (NaCl) y otras sales minerales.

Las aguas residuales provenientes del lavado de calles arrastran principalmente materia sólida inorgánica en suspensión, además de otros productos (fenoles, plomo, insecticidas).

El vertido de aguas residuales urbanas sin depurar ejerce sobre los cauces receptores toda una serie de efectos negativos como lo son:

- Aparición de fangos y materia flotante

La fracción sedimentable de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales origina sedimentos en el fondo de los cauces, mientras que, la fracción flotante da lugar a la acumulación de grandes cantidades de sólidos en la superficie y/o en las orillas de los cauces receptores.

- Agotamiento del contenido de oxígeno presente en las aguas

Los componentes de las aguas residuales fácilmente oxidables comenzarán a ser degradados vía aerobia por la flora bacteriana presente en las aguas del cauce, con el consiguiente consumo de parte del oxígeno disuelto en la masa líquida.

Si este consumo es excesivo, el contenido en oxígeno disuelto descenderá por debajo de los valores mínimos necesarios para el desarrollo de la vida acuática. Consumido el oxígeno disponible, los procesos de degradación vía anaerobia generarán olores desagradables, al liberarse gases que son los causantes de estos olores.

- Aporte excesivo de nutrientes

Las aguas residuales contienen nutrientes causantes del crecimiento descontrolado de algas y otras plantas en los cauces receptores (eutrofización). Este crecimiento excesivo de biomasa puede llegar a impedir el empleo de estas aguas para usos domésticos e industriales.

- Daños a la salud pública

Los vertidos a cauces públicos de las aguas residuales sin tratar pueden fomentar la propagación de organismos patógenos para el ser humano (virus, bacterias, protozoos y helmintos). Entre las enfermedades que pueden propagarse a través de las aguas contaminadas por los vertidos de aguas residuales urbanas, destacan: el tifus, el cólera, la disentería y la hepatitis A.

La baja disponibilidad de oxígeno disuelto, limita la capacidad autodepuradora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las aguas residuales antes de su vertido al cauce.

2.2. Aguas residuales industriales

Son las que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua, incluyéndose los líquidos residuales, aguas de proceso y aguas de refrigeración. Son variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos no solo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria.

Las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso, únicamente en determinadas épocas del año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. Son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día. Son mucho más contaminadas que las aguas residuales urbanas, su alta carga contaminante unida a la enorme variabilidad que presentan, hace necesario que sean analizadas detalladamente para determinar cuál es el tratamiento más adecuado en cada caso.

2.2.1. Procedencia de la contaminación en aguas industriales

La contaminación de las aguas, proveniente de la actividad industrial puede proceder de:

- Líquidos residuales

Son aquellos que se derivan de la fabricación de productos, siendo principalmente: disoluciones de productos químicos tales como lejías negras, los baños de curtido de pieles, las melazas de la producción de azúcar, etc.

Se originan en la utilización del agua como medio de transporte, lavado, refrigeración directa y que puede contaminarse con los productos de fabricación o incluso de los líquidos residuales.

- Aguas de refrigeración indirecta

No han entrado en contacto con los productos y la única contaminación que arrastran es su temperatura. Hoy en día hay que considerar también la existencia de productos que evitan problemas de explotación (estabilizantes contra las incrustaciones y corrosiones, algicidas, etc.) que pueden ser contaminantes.

2.2.2. Tipos de vertidos industriales

Los vertidos industriales se pueden clasificar en:

- Continuos

Proviene de procesos en los que existe una entrada y una salida continua de agua (Procesos de transporte, lavado, refrigeración, etc.).

- Discontinuos

Proceden de operaciones intermedias. Son los más contaminados (Baños de decapado, baños de curtidos, lejías negras, emulsiones, etc.). Al aumentar el tamaño de la industria, algunos vertidos discontinuos pueden convertirse en continuos.

2.3. Procesos de oxidación avanzada

Son procesos de tratamiento de aguas que implican generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo para purificar el agua. Estas especies son altamente inestables y reactivas, con alto poder oxidante y elevada velocidad de reacción para la oxidación de materia orgánica, se caracterizan por su baja selectividad en el ataque oxidativo, siendo este atributo, uno de los objetivos para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

Este tipo de procesos utilizan diferentes agentes oxidantes (O_2 , O_3 , H_2O_2), y han ganado gran interés en los últimos años para la eliminación de compuestos poco biodegradables, refractarios a la degradación química y elevada toxicidad. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelos. Permiten incluso la desinfección por inactivación de bacterias y virus.

Se ha ido incrementando el interés de la aplicación de este tipo de procesos para conseguir aguas con el mínimo contenido de contaminantes que son más difíciles de eliminar (fenoles, plaguicidas, tensoactivos, disolventes,

surfactantes, etc.) y que son potencialmente peligrosos para el medio ambiente.

El tratamiento por POA puede dar lugar a la mineralización completa de los contaminantes a dióxido de carbono (CO_2), agua, compuestos inorgánicos o a su transformación en productos inocuos. Por otro lado, una descomposición parcial de los contaminantes orgánicos no biodegradables conduce a intermedios que sí lo son, de modo que las combinaciones de POA como pretratamientos, seguidos de procesos biológicos, parecen muy viables desde el punto de vista económico.

Los POA se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo (OH^\cdot). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos o por otras formas de energía, y es altamente efectivo en la oxidación de materia orgánica.

Los POA son útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores.

Los procesos involucrados poseen una mayor factibilidad termodinámica y una velocidad de oxidación muy incrementada por la participación de radicales, principalmente el radical hidroxilo (OH^\cdot). 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 Ozono (O_3).

2.3.1. Ventajas de las tecnologías avanzadas de oxidación

A continuación se describen las ventajas de estas tecnologías sobre los métodos convencionales:

- Consumen menos energía que otros métodos.
- Mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- Además de cambiar de fase al contaminante, también lo transforman químicamente.
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.
- Es usual conseguir la destrucción del contaminante. A diferencia de las tecnologías convencionales, que no emplean especies fuertemente oxidantes y que no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- Ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- Generalmente no generan barros, que requieren de un proceso de tratamiento adicional.
- Útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- Se pueden tratar contaminantes a muy baja concentración.

- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.

2.3.2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada

Estos procesos se pueden clasificar en fotoquímicos y no fotoquímicos

- Procesos fotoquímicos
 - Fotólisis directa
 - Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
 - UV/peróxido de hidrógeno
 - UV/O₃
 - Foto-Fenton y relacionadas
 - Fotocatálisis heterogénea
 - Radiólisis
- Procesos no fotoquímicos
 - Ozonización en medio alcalino (O₃/OH⁻)
 - Ozonización con peróxido de hidrógeno (O₃/H₂O₂)
 - Procesos Fenton (Fe²⁺/H₂O₂) y relacionados
 - Tratamiento con haces de electrones
 - Descarga electrohidráulica – ultrasonido
 - Plasma no térmico
 - Oxidación electroquímica
 - Oxidación en agua subcrítica y supercrítica

2.4. Fotocatálisis heterogénea

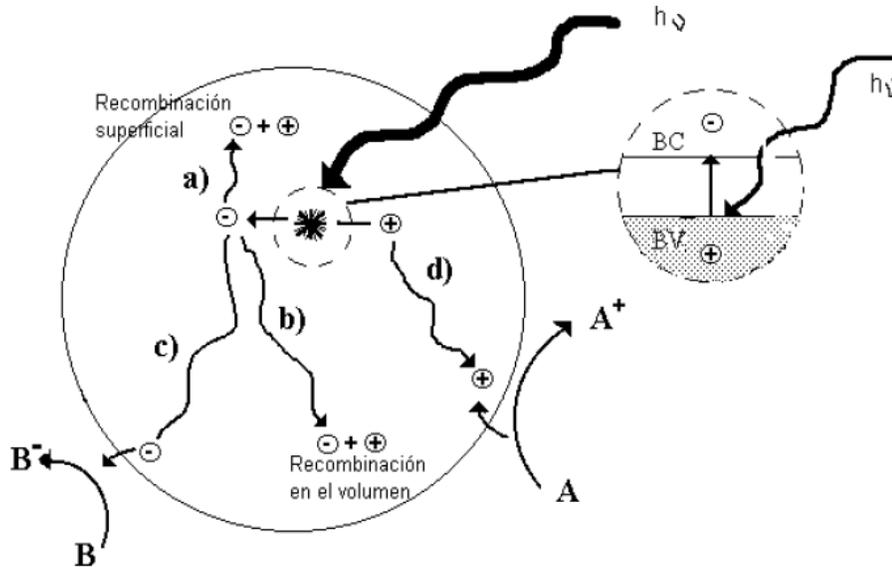
La fotocatalisis heterogénea se basa en la adsorción directa o indirecta de energía radiante, por un sólido (normalmente un semiconductor de banda ancha). En la región interfacial entre sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción o de remoción de los contaminantes, sin que el catalizador sufra cambios químicos.

La excitación del semiconductor puede tener lugar de dos formas:

- Por excitación inicial de moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador, que a su vez son capaces de introducir electrones en el semiconductor.
- Por excitación directa del semiconductor, siendo este el que absorbe los fotones usados en el proceso.

La figura muestra los procesos químicos que ocurren en una partícula de semiconductor cuando esta es excitada con luz suficientemente energética. En estas condiciones se crean pares electrón-hueco, cuya vida media está en el rango de los nanosegundos, en ese lapso deben migrar a la superficie y reaccionar con especies adsorbidas (procesos c y d).

Figura 1. **Procesos en la interfaz semiconductor-electrolito**



Fuente: DOMÈNECH, Xavier; JARDIM, Wilson y Litter Marta. *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes*, p. 21

Los pares electrón-hueco que no alcanzan a separarse y a reaccionar con especies en la superficie se recombinan y la energía se disipa. Esta recombinación puede tener lugar tanto en la superficie como en el seno de la partícula (procesos a y b, respectivamente). El proceso neto es la catálisis de la reacción entre el oxidante B y el reductor A.

Existen varios materiales con propiedades aptas para actuar como catalizadores y llevar a cabo reacciones fotosensibilizadas, por ejemplo, óxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO), sulfuro de cadmio (CdS), óxidos de hierro, óxido de wolframio (WO_3), Sulfuro de Zinc (ZnS), etc. Estos materiales son económicamente asequibles, e incluso muchos de ellos participan en procesos químicos en la naturaleza. La mayoría puede 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), lo cual incrementa el interés para un posible aprovechamiento de la luz solar.

Los fotocatalizadores más investigados son los óxidos metálicos, semiconductores de banda ancha y particularmente el óxido de titanio (TiO_2), que presenta una elevada estabilidad química que lo hace apto para trabajar en un amplio rango de pH, al mismo tiempo que es capaz de producir transiciones electrónicas por absorción de luz en el ultravioleta cercano (UV-A) cuya longitud de onda va de 315 nm a 400 nm.

Los procesos fotocatalíticos basados en el dióxido de titanio han alcanzado un elevado grado de madurez tecnológica. Si bien el rendimiento cuántico (número de eventos producidos por fotón absorbido) suele ser bajo en términos de conversión química, los rendimientos obtenidos, en términos de conversión en función del tiempo, aprovechando luz solar o iluminación con lámparas son adecuadamente elevados en muchos casos.

La fotocatalisis comparte con otros PAO la característica de involucrar radicales hidroxilo en el mecanismo de reacción. Normalmente, en aplicaciones ambientales, los procesos fotocatalíticos se llevan a cabo en ambientes aeróbicos, con lo cual el oxígeno adsorbido es la principal especie aceptora de electrones.

2.5. Desinfección de aguas residuales

Las enfermedades infecciosas son transmitidas principalmente por la contaminación de las fuentes de agua con materia fecal, el cual puede ser un agente muy activo para el transporte de enfermedades. El uso de tales aguas

para beber o cocinar, el contacto con la misma durante baños, o la inhalación de pequeñas gotitas (aerosoles) pueden resultar en infecciones.

La desinfección de aguas es un proceso que forma parte de una planta de tratamiento de agua, que tiene como objetivo la inactivación de microorganismos presentes en el medio, minimizando la probabilidad de transmisión hídrica de enfermedades. El efluente de una planta de tratamiento es generalmente desinfectado antes de la descarga en el cuerpo de agua receptor, para disminuir el riesgo de enfermedades ocasionado por organismos patógenos que pudieran existir aún luego del tratamiento completo.

La desinfección es un proceso utilizado para satisfacer estos requerimientos e inactivar los patógenos. Generalmente la efectividad de la desinfección depende del tiempo de exposición y de la toxicidad del desinfectante.

2.5.1. Tipos de microorganismos a eliminar

Los patógenos de mayor consideración son bacterias entéricas, virus y parásitos. Algunas de las enfermedades originadas por estas bacterias son por ejemplo la salmonelosis, el cólera, la gastroenteritis y la disentería bacteriana. Las infecciones virales posibles incluyen la hepatitis, otras enfermedades parasitarias son las disenterías por giardias y por amebas.

El agua es uno de los principales vehículos transportadores de microorganismos, causantes de enfermedades provenientes del aparato digestivo del hombre y de otros animales. Las coliformes fecales son un grupo grande de microorganismos, habitantes usuales de los intestinos de los animales superiores. Estos microorganismos son de fácil identificación

comparados con los microorganismos patógenos, que normalmente se encuentran en mucho menor número y cuya identificación es laboriosa.

La presencia de coliformes en una muestra no siempre indica que el agua está contaminada con microorganismos patógenos, sino que, en términos estadísticos, su concentración puede y debe servir como parámetro para alertar sobre la existencia de contaminación fecal y de microorganismos patógenos.

Los microorganismos patógenos están relacionados con enfermedades específicas de transmisión hídrica. La fiebre tifoidea, las fiebres paratifoideas, la disentería bacteriana y el cólera son causadas por bacterias, la amebiasis o disentería amebiana por protozoarios, la esquistosomosis por gusanos (helminetos) y larvas, en tanto que ciertos virus originan la hepatitis infecciosa y la poliomielitis.

2.5.2. Mecanismos de desinfección y reinfeksi3n

La mayoría de agentes desinfectantes utilizados en aguas inactiva los microorganismos por una interacci3n qu3mica. La inactivaci3n de los microorganismos por irradiaci3n se debe a la absorci3n de radiaci3n ultravioleta (UV) de alta energ3a, que causa reacciones fotoqu3micas de los componentes fundamentales de las c3lulas, perjudicando as3 su funcionamiento normal. Se interrumpe el mecanismo de duplicaci3n o se provoca la muerte de la c3lula.

El mecanismo de desinfecci3n por UV depende de la absorci3n de la radiaci3n por las prote3nas, y por los 3cidos nucleicos (RNA y DNA) de un microorganismo determinado. La absorci3n de dosis altas de UV por las prote3nas presentes en las membranas celulares lleva a la ruptura de esas membranas y, consecuentemente, a la muerte de la c3lula.

En cambio, la absorción de dosis más bajas de UV por el DNA puede interrumpir la capacidad del microorganismo de reproducirse, impidiéndole infectar el medio.

El DNA es un ácido nucleico que contiene una secuencia de cuatro bases nitrogenadas (adenina, citosina, guanina y timina), secuencia que constituye el código genético. Las dos hélices que constituyen el DNA permanecen unidas por los enlaces de hidrógeno que se establecen entre bases apareadas de ambas hélices.

Algunas moléculas presentes en el DNA, como las purinas y pirimidinas, absorben fuertemente la radiación ultravioleta (con un máximo en 254 nm) y sufren cambios químicos como formación de dímeros e hidratos. La dimerización de la timina ha sido considerada como la causa principal del efecto mutagénico de la radiación UV.

Con el proceso de desinfección con radiación ultravioleta pueden ocurrir dos fenómenos:

- Bajo algunas condiciones, ciertos microorganismos poseen la capacidad de reparar el daño causado al DNA durante la exposición y retornar al estado original, inclusive se vuelven a reproducir.
- Con algunas células dañadas puede ocurrir el proceso de fotorreactivación, si la dimerización no es muy irreversible, la radiación solar entre 330-500 nm, puede catalizar la ruptura de los dímeros y producir reversión.

2.6. Desinfección de agua por fotocátalisis heterogénea

Las tecnologías avanzadas de oxidación han recibido gran atención porque, evidentemente, estos procesos pueden ser utilizados para la destrucción de microorganismos patogénicos. La fotocátalisis heterogénea ha sido bastante investigada, ya que el radical hidroxilo (OH^\cdot) es uno de los radicales libres más reactivos y uno de los oxidantes más fuertes. También se ha encontrado que la fotocátalisis heterogénea con óxido de titanio (TiO_2) es efectiva en sistemas bioquímicos para destruir células malignas.

El uso de la fotocátalisis heterogénea con óxido de titanio (TiO_2) para la desinfección ha demostrado ser un proceso con mucho potencial porque evita la formación de compuestos halogenados que pueden ser peligrosos, además de no ser una técnica cara y parece actuar sobre todos los tipos de bacterias, incluyendo Gram (+) y (-), y sobre otros microorganismos.

El óxido de titanio (TiO_2) es abundante, barato y se puede recuperar de forma sencilla o puede ser inmovilizado sobre soportes adecuados. La técnica fotocatalítica es particularmente conveniente para instalaciones rurales y remotas, incluso se ha considerado su aplicación a la desinfección de aguas municipales. No requiere suministro eléctrico de alto voltaje como el ozono y puede ser usado aun con luz solar.

Sin embargo, la materia orgánica interfiere con el método, y es aconsejable aplicar un tratamiento fotocatalítico como paso final de un tratamiento en etapas. La variedad de microorganismos tratados indica la versatilidad de la técnica: bacterias, como *Escherichia coli*, *Lactobacillus acidophilus*, *Coliformes fecales*, *Streptococcus mutans*, *Streptococcus rattus*, *Streptococcus cricetus*, *Streptococcus sobrinus* AHT, *Deinococcus radiophilus*,

Serratia marcescens. Levaduras, como *Saccharomyces cerevisiae*; algas, como *Chlorella vulgaris*, y virus como MS2 fago, *B. fragilis* bacteriofago y Poliovirus 1.

Los virus requieren el uso de agentes adicionales como el Hierro (Fe (II)) y la presencia de oxígeno (O_2). Aunque el mecanismo de acción es aún desconocido, se cree que la actividad bactericida se debe a la oxidación directa de la coenzima A. Los radicales hidroxilo (OH^\cdot) y probablemente otras especies activas como el ion hiperóxido (O_2^\cdot), ion hidroperóxido (HO_2^\cdot) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2) provocan daños sobre los microorganismos. Debido al gran tamaño de las bacterias, se postula también que operan interacciones de largo alcance entre ellas y el fotocatalizador en contraste con las interacciones de corto alcance entre moléculas.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables dependientes e independientes tomadas en cuenta para evaluar la remoción de coliformes fecales por medio de fotocátalisis heterogénea fueron las siguientes:

- Independientes: las variables independientes fueron la cantidad de catalizador agregado y el tiempo de irradiación de luz UV.
- Dependientes: la variable dependiente o de respuesta fue la cantidad de coliformes fecales.

3.2. Delimitación de campo de estudio

Se evaluó la acción desinfectante que tiene la fotocátalisis heterogénea para la remoción de coliformes fecales, se trabajó a escala laboratorio en un laboratorio ambiental con una muestra de agua residual tomada de la descarga de una granja avícola, variando la cantidad de catalizador agregada en 500, 750 y 1 000 ppm. Al agregar cada una de estas cantidades de catalizador se varió el tiempo de exposición a la luz UV, y se tomó una alícuota de 100 mL al haber transcurrido 5, 10 y 15 minutos, luego se realizó una repetición de cada una de las corridas.

Todas las muestras tomadas fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis Físicoquímicos y Microbiológicos (LAFYM) y con los resultados se determinó la cantidad de coliformes removida en relación al conteo inicial.

Se llevó a cabo un control al cual no se le agregó catalizador, y al compararlo con los resultados obtenidos, se determinó el efecto que el mismo tenía en el proceso, además se calculó el porcentaje de remoción de coliformes que se daba en cada corrida y se determinó la condición a la cual se daba una máxima eficiencia.

3.3. Recursos humanos disponibles

Las personas que participaron en la ejecución, elaboración, supervisión y revisión del estudio fueron:

- Tesista: Gerson Xavier Velásquez Vásquez
- Asesor: Ing. Francisco Khalil de León Barrios
- Analista de laboratorio

3.4. Recursos materiales disponibles

La cristalería, equipos y reactivos utilizados para la remoción de coliformes fecales fueron:

- Equipo
 - Potenciómetro (medidor de pH)
 - Fotorreactor
 - Bolsas *whirlpack*

- Pipeta volumétrica 100 mL
 - *Beaker* 1 000 mL
 - Balanza analítica
 - Papel filtro 110 mm de diámetro
 - Embudo
 - *Erlenmeyer* 100 mL
 - Agitador magnético
 - Barra magnética de agitación
- Reactivos
 - Óxido de titanio (TiO₂)(anatasa)
 - Muestra de agua residual

3.5. Técnica cuantitativa

Para el análisis de la cantidad de coliformes fecales se utilizó la técnica de número más probable, que es una estrategia eficiente de estimación de densidades poblacionales, especialmente cuando una evaluación cuantitativa de células individuales no es factible.

La técnica se basa en la determinación de presencia o ausencia en réplicas de diluciones consecutivas de atributos particulares de microorganismos presentes en muestras de suelo u otros ambientes.

Por lo tanto, un requisito importante de este método es la necesidad de poder reconocer un atributo particular de la(s) población(es) en el medio de crecimiento a utilizarse. El estimado de densidad poblacional se obtiene del

patrón de ocurrencia de ese atributo en diluciones seriadas y el uso de una tabla probabilística.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La recolección y ordenamiento de la información se realizó de la siguiente manera:

3.6.1. Procedimiento

- Se transfirieron 700 mL de la muestra de agua residual al *beaker* de 1 000 mL.
- Se agregó el óxido de titanio (TiO₂).
- Se colocó en el reactor y se encendió para iniciar el proceso.
- Luego de 5 minutos, se tomó una alícuota de 100 mL en una bolsa *whirlpack*.
- Se coloca la muestra tomada en refrigeración a 4 °C.
- Se repite el paso 4 y 5 luego de haber transcurrido 10 minutos del inicio.
- Se repiten los pasos 4 y 5 luego de transcurridos 15 minutos desde el inicio.
- Se repitió desde el paso 2 cambiando la cantidad de catalizador (500, 750 y 1 000 ppm)

3.6.2. Ordenamiento de la información

Para ordenar los datos se utilizaron las siguientes tablas:

Tabla I. **Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, sin añadir catalizador (control)**

Tiempo de Irradiación (min)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
0	T 00
5	C1
10	C2
15	C3

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, agregando 500 ppm de TiO₂**

Tiempo de Irradiación (min)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
5	T 1,1
	R 1,1
10	T 1,2
	R 1,2
15	T 1,3
	R 1,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, agregando 750 ppm de TiO₂**

Tiempo de Irradiación (min)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
5	T 2,1
	R 2,1
10	T 2,2
	R 2,2
15	T 2,3
	R 2,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Conteo de coliformes fecales a diferentes tiempos de irradiación de luz UV, agregando 1 000 ppm de TiO₂**

Tiempo de Irradiación (min)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
5	T 3,1
	R 3,1
10	T 3,2
	R 3,2
15	T 3,3
	R 3,3

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En esta sección se muestran las tablas en donde se tabulan y ordenan los resultados obtenidos, con el objetivo de facilitar el procesamiento de los mismos:

Tabla V. **Arreglo para tratamientos con una réplica**

Tratamiento	Tiempo		
	1	2	3
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}
	R_{11}	R_{12}	R_{13}
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}
	R_{21}	R_{22}	R_{23}
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}
	R_{31}	R_{32}	R_{33}

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Media aritmética para cada tratamiento**

Tratamiento	Tiempo		
	1	2	3
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Para comprobar que el proceso de fotocátalisis funciona en la remoción de coliformes, se evaluaron dos parámetros: la cantidad de catalizador agregada y el tiempo de exposición de la muestra a la luz UV.

Variando estos dos parámetros se realizaron 9 corridas además de una repetición, por lo que en total se tomaron 18 muestras, a las que se les encontró la cantidad de coliformes presentes en cada uno de los tiempos y se determinó la cantidad óptima de catalizador con la que se logra una mayor remoción.

3.8.1. Diseño experimental

Se hizo un análisis de varianza con dos factores, por lo que se escogió un diseño de cuadrado latino 3 x 3, con este diseño se puede eliminar dos fuentes de variabilidad perturbadora.

El diseño es un arreglo cuadrado en el que los tratamientos se denotan por letras latinas A, B, C; es completamente aditivo, lo que significa que no hay interacción entre renglones, columnas y tratamientos.

Tabla VII. **Cuadrado latino 3 x 3**

Cantidad de catalizador	Tiempo		
	1	2	3
1	A	B	C
2	B	C	A
3	C	A	B

Fuente: MONTGOMERY, Douglas C., *Diseño y Análisis de Experimentos*, p. 148.

A continuación se presentan las expresiones para calcular la varianza

Tabla VIII. **Análisis de varianza del diseño del cuadrado latino**

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos	SS _{Tr}	p - 1	$\frac{SS_{Tr}}{p - 1}$	$\frac{MS_{Tr}}{MS_E}$
Columnas	SS _C	p - 1	$\frac{SS_C}{p - 1}$	
Renglones	SS _R	p - 1	$\frac{SS_R}{p - 1}$	
Error	SS _E	(p-2)(p -1)	$\frac{SS_E}{(p - 2)(p - 1)}$	
Total	SS _T	P ² - 1		

Fuente: MONTGOMERY Douglas C., *Diseño y Análisis de Experimentos*, p. 146.

3.8.2. Análisis de hipótesis

Para determinar la igualdad de las medias de los tratamientos se utilizó el estadístico de prueba F_o .

Para determinar si se acepta o se rechaza la hipótesis nula o la alternativa se toma en cuenta el siguiente criterio:

Si $F_o > F_{\alpha, p-1, (p-1)(p-2)}$, se rechaza la hipótesis nula, utilizando $\alpha = 0,05$ de modo que se tiene un intervalo de confianza del 95 %.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla IX. **Cantidad de coliformes presentes inicialmente y a diferentes tiempos de irradiación de luz UV sin catalizador (control)**

Tiempo de Irradiación (min)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
0	677 000
5	565 000
10	404 000
15	529 000

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cantidad de coliformes presentes a diferentes tiempos de irradiación de luz UV con diferentes cantidades de catalizador**

Tiempo (min)	Cantidad de catalizador (ppm)		
	500	750	1 000
5	402 000	348 500	505 500
10	341 500	374 500	329 500
15	479 500	380 000	392 500

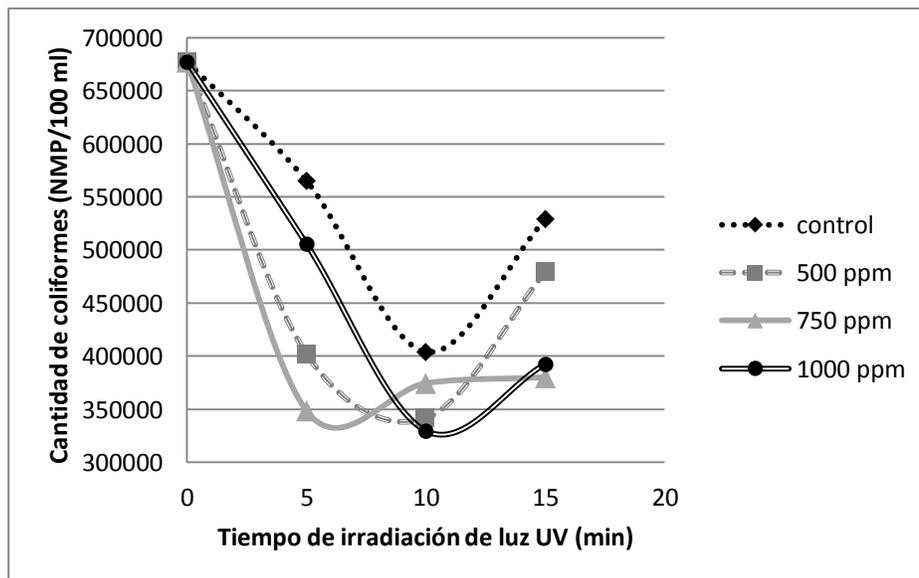
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Porcentaje de remoción de coliformes fecales en cada tratamiento**

Tiempo (min)	Cantidad de catalizador (ppm)		
	500	750	1 000
5	40,6	48,5	17,9
10	49,6	44,7	51,3
15	29,2	43,9	42,0

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Remoción de coliformes fecales en cada uno de los tratamientos**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se evaluó la eficacia de la fotocátalisis heterogénea catalizada con óxido de titanio (TiO_2) para inactivar los coliformes fecales presentes en el efluente generado en una granja avícola. Los parámetros del proceso que fueron estudiados, fue la cantidad de catalizador agregado y el tiempo de irradiación de luz UV. Se tomaron 700 mL de muestra que fueron irradiados con luz UV de una lámpara de luz UV-A de 20 W de potencia y longitud de onda de 360 nm.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas IX, X, XI y en la figura 2 de la sección de resultados; con las condiciones de operación establecidas para llevar a cabo los tratamientos, si se compara la fotocátalisis heterogénea utilizando óxido de titanio (TiO_2) como catalizador con la fotólisis (sin catalizador) es evidente que ambas remueven coliformes y que el óxido de titanio (TiO_2) aumenta la acción desinfectante de la luz UV.

Muchos de los desinfectantes que se utilizan en la actualidad eliminan los microorganismos por interacción química, con la fotocátalisis heterogénea se cree que el efecto de desinfección es producto de la oxidación directa de la coenzima A, los radicales que se generan entre el fotocatalizador y la luz UV provocan daños sobre los microorganismos evitando su duplicación.

La cantidad óptima de óxido de titanio (TiO_2) agregada depende, principalmente de la naturaleza del contaminante a tratar, así como de la geometría del reactor. La concentración óptima de óxido de titanio (TiO_2) reportada en la literatura para la desinfección por fotocátalisis, está en el rango 100 ppm a 5 000 ppm, se eligió trabajar a 500, 750 y 1 000 ppm, pues cuando

la concentración de óxido de titanio (TiO_2) es muy alta, la velocidad de reacción disminuye debido a la opacidad de la disolución, que impide que el catalizador de la parte más interna del reactor se ilumine.

En los resultados de la figura 2 y la tabla XI, se observa que se obtiene una máxima remoción al irradiar las muestras durante 10 minutos, pero la máxima eficiencia se logra con una cantidad de catalizador de 1 000 ppm, según varios estudios realizados, la forma en que la radiación incide sobre el reactor y la longitud del camino óptico de esta en su interior son fundamentales, para poder determinar la concentración óptima de catalizador, y si la lámpara está en el exterior y el camino óptico es corto (1 a 2 cm máx.), la máxima eficiencia se consigue en el intervalo de 1 000 a 2 000 ppm de óxido de titanio (TiO_2).

Las bacterias han desarrollado mecanismos de autoprotección que podrían retardar su desactivación, en el proceso de desinfección con luz ultravioleta pueden ocurrir los siguientes fenómenos: En ciertas condiciones, algunos microorganismos tienen la capacidad de reparar el daño causado al DNA durante la exposición y retornar al estado original, inclusive volviéndose a reproducir; y, en algunas células dañadas puede ocurrir la fotorreactivación si la dimerización no es muy irreversible.

En la figura 2 se puede observar que en cada uno de los tratamientos realizados e incluso en el control, hay un punto en que se da un valor máximo de remoción de coliformes, pero luego de este punto la inactivación se detiene, lo que lleva al recobro de las bacterias afectadas por el proceso y posiblemente a la reproducción de las que no fueron afectadas. Hay varios parámetros que influyen en el proceso y afectan la eficiencia del mismo, los cuales pudieron

tener incidencia en la eficiencia obtenida y en que se haya detenido la desinfección de las bacterias.

La muestra tomada se trabajó como sale de la planta, esta tenía un pH inicial de 7,19, se sabe que el proceso de fotocátalisis 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, alterando la velocidad a la que se da la degradación.

La concentración inicial de bacterias influye en la desactivación, pues se requieren tiempos más largos cuando la concentración inicial de bacterias es más alta. La intensidad de la luz irradiada es otro factor a tomar en cuenta, pues se sabe que se obtiene una mayor efectividad al aplicar una intensidad alta de UV por un corto tiempo, que al aplicar una intensidad baja por un periodo largo de tiempo.

La presencia de iones como fosfato diácido (H_2PO_4^-), fosfato ácido (HPO_4^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}) en la desactivación intervienen en el proceso, pues provocan una inhibición alta del proceso fotocatalítico, aunque el efecto inhibitorio de sales inorgánicas puede modificarse cambiando el pH de la solución, la inhibición se relaciona con la adsorción de dichos iones sobre el catalizador, que compite con la adsorción del contaminante.

Uno de los parámetros de mayor relevancia a tomar en cuenta en el proceso fotocatalítico es, la presencia de oxígeno, pues este participa en la captura de huecos, una de las dos semirreacciones que ocurre en el mecanismo de reacción fotocatalítico. El oxígeno es el oxidante más empleado, ya que es el más barato y no compite con el sustrato en el proceso de adsorción.

Se ha comprobado que cuando desaparece el oxígeno disuelto en el agua y no existe ninguna otra especie oxidante, el proceso fotocatalítico se detiene totalmente, al detenerse completamente el proceso conllevaría a que las bacterias que hayan sobrevivido se puedan reproducir, o las que no fueron demasiado dañadas tengan oportunidad de autorepararse, lo que haría que se diera un recrecimiento de la población de bacterias.

Por medio del análisis de varianza se aceptó la hipótesis nula y se rechazó la hipótesis alternativa para la interacción entre los factores cantidad del catalizador y tiempo de irradiación de luz UV como efecto conjunto. Por lo que a las condiciones establecidas de trabajo no hay diferencias significativas entre la cantidad de catalizador agregada y el tiempo de irradiación de luz UV.

CONCLUSIONES

1. Al agregar óxido de titanio (TiO_2) como catalizador al proceso de desinfección por luz UV, se da un aumento en la capacidad de desinfección que tiene la luz UV por sí sola.
2. El proceso de fotocátalisis heterogénea es viable para tratar las aguas generadas por la granja avícola, ya que se logra remover el 51,3 % de coliformes fecales.
3. Con las condiciones establecidas para llevar a cabo el proceso de desinfección del agua a diferentes cantidades de catalizador y tiempo de irradiación, se logró la máxima eficiencia a los 10 minutos de irradiación de luz UV, con 1 000 ppm de fotocatalizador.
4. Al haber una carencia de oxígeno en el proceso, la fotocátalisis puede detenerse, lo que lleva a que aumente otra vez la cantidad de bacterias tratadas, pues este es el encargado de una de las semirreacciones de importancia en el mecanismo de desinfección.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar el proceso de fotocátalisis heterogénea como complemento de la cloración, pues este proceso destruye los subproductos de la desinfección, llamados DBP (*desinfection by products*), que se forman por la interacción del cloro con la materia orgánica natural, y que son dañinos a la salud.
2. Implementar un tratamiento de fotocátalisis heterogénea como paso final de una serie de tratamientos previos, para refinar el efluente, ya que al ser un proceso no selectivo, tiene la capacidad de eliminar los contaminantes remanentes.
3. Agregar al proceso una fuente que suministre oxígeno continuamente, ya que la ausencia del mismo detiene completamente el proceso de fotocátalisis heterogénea, y en el tratamiento de coliformes es probable que se vuelva a dar un aumento de los mismos.
4. Implementar el proceso a escala real para evaluar los costos y efectividad del proceso de fotocátalisis heterogénea dentro de las granjas avícolas.

BIBLIOGRAFÍA

1. BLANCO, Julián et al. *Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: estado del arte*. Argentina: Red CYTED VIII-G, 2001. 26 p.
2. DOMÈNECH, Xavier; JARDIM, Wilson; LITTER, Marta. *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes*. Argentina: Red CYTED VIII-G, 2001. 24 p.
3. GUIMARÃES, José Roberto et al. *Desinfección de Agua*. Argentina: Red CYTED VIII-G, 2001. 12 p.
4. MONTGOMERY, Douglas C. *Diseño y Análisis de Experimentos*. 2ª ed. México: Limusa, 2004. 686 p.
5. SUIB, Steven L. *New and future developments in catalysis*. USA: Elsevier, 2013. 478 p.
6. WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond. *Probabilidad y Estadística*. México: McGraw-Hill, 1992. 797 p.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. Muestra de cálculo

1. Cálculo del valor medio

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde

- \bar{x} = media para una muestra
- n = tamaño de la muestra
- x_i = i ésimo valor posible de x

Ejemplo:

$$x_i = \frac{369\,000 + 435\,000}{2} = 402\,000$$

Nota: de la misma forma se calcularon las medias de la cantidad de coliformes para todas las corridas realizadas. Véase Apéndice 2.

2. Cálculo del porcentaje de remoción de coliformes fecales

$$\%_{re} = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100$$

Donde

- $\%_{re}$ = porcentaje de remoción
- C_o = Cantidad inicial de coliformes fecales
- C_f = Cantidad final de coliformes fecales

Ejemplo:

$$\%_{re} = \frac{677\ 000 - 402\ 000}{677\ 000} * 100 = 40,6 \%$$

Nota: de la misma forma se calcularon los porcentajes de remoción para uno de los tratamientos realizados. Véase Apéndice 2.

3. Ecuaciones para calcular grados de libertad

$$GL_{Tr} = p - 1$$

$$GL_C = p - 1$$

$$GL_R = p - 1$$

$$GL_E = (p - 2)(p - 1)$$

$$GL_T = p^2 - 1$$

Donde

- GL_{Tr} = grados de libertad para tratamientos
- GL_C = grados de libertad para las columnas
- GL_R = grados de libertad para renglones
- GL_E = grados de libertad para el error
- GL_T = grados de libertad para interacción entre factores
- p = número de niveles

Ejemplo:

$$GL_{Tr} = 3 - 1 = 2$$

Nota: de la misma forma se calcularon los demás grados de libertad.
Véase Apéndice 2.

4. Cálculo de la suma de cuadrados total

$$SS_T = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{r^2}$$

Donde

- SS_T = suma de cuadrados total
- y = medias de tratamientos
- r = total de niveles

Ejemplo:

$$SS_T = 1,48E12 - \frac{(3\,603\,500)^2}{9} = 4,26E10$$

Nota: Véase Apéndice 2.

5. Cálculo de la suma de cuadrados de tratamientos

$$SS_{Tr} = \sum \frac{T_r^2}{r} - \frac{(\sum y)^2}{r^2}$$

Donde

- SS_{Tr} = suma de cuadrados de tratamientos
- T_r = total de tratamientos
- y = medias de tratamientos
- r = total de niveles

Ejemplo:

$$SS_{Tr} = \frac{4,39E12}{3} - \frac{(3\ 603\ 500)^2}{9} = 2,18E10$$

Nota: Véase Apéndice 2.

6. Ecuaciones para calcular suma de cuadrados para columnas y renglones

$$SS_c = \sum \frac{T_c^2}{r} - \frac{(\sum y)^2}{r^2}$$

$$SS_r = \sum \frac{T_r^2}{r} - \frac{(\sum y)^2}{r^2}$$

Donde

- SS_c = suma de cuadrados de columnas
- SS_r = suma de cuadrados renglones
- T_c = Total en las columnas
- T_r = Total en los renglones
- y = medias de tratamientos
- r = total de niveles

Ejemplo:

$$SS_c = 1.44E12 - \frac{(3\ 603\ 500)^2}{9} = 5,31E9$$

Nota: Véase Apéndice 2.

7. Cálculo de la suma de cuadrados del error

$$SS_E = SS_T - SS_{Tr} - SS_c - SS_r$$

Donde

- SS_E = suma de cuadrados del error
- SS_T = suma de cuadrados del total
- SS_{Tr} = suma de cuadrados de tratamientos
- SS_c = suma de cuadrados de columnas
- SS_r = suma de cuadrados de renglones

Ejemplo:

$$SS_E = 4,26E10 - 2,18E10 - 5,31E9 - 1,26 E10 = 2,89E9$$

Nota: Véase Apéndice 2.

8. Ecuaciones para el cálculo de cuadrados medios

$$S_{Tr}^2 = \frac{SS_{Tr}}{GL_{Tr}}$$

$$S_E^2 = \frac{SS_E}{GL_E}$$

Donde

- S_{Tr}^2 = cuadrado medio para los tratamientos
- S_E^2 = cuadrado medio para el error
- SS_{Tr} = suma de cuadrados de tratamientos
- SS_r = suma de cuadrados del error
- GL_{Tr} = grados de libertad para tratamientos
- GL_E = grados de libertad para el error

Ejemplo:

$$S_{Tr}^2 = \frac{2,18E10}{2} = 1,09E10$$

Nota: Véase Apéndice 2.

9. Cálculo para el estadístico de prueba F_0

$$F_0 = \frac{S_{Tr}^2}{S_E^2}$$

Donde

- F_0 = medida estadística de prueba
- S_{Tr}^2 = cuadrado medio para los tratamientos
- S_E^2 = cuadrado medio para el error

Ejemplo:

$$F_0 = \frac{1,09E10}{1,44E9} = 7,54$$

Nota: Véase Apéndice 2.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos calculados

A continuación se presentan los resultados calculados con base en la muestra de cálculo:

Se realizó una repetición para cada una de las corridas realizadas y se calculó el promedio de ambas.

Tabla 1. **Medias para la cantidad de coliformes presentes a diferentes tiempos de irradiación de luz UV con diferentes cantidades de catalizador**

Tiempo (min)	Cantidad de catalizador (ppm)		
	500	750	1 000
5	402 000	348 500	505 500
10	341 500	374 500	329 500
15	479 500	380 000	392 500

Fuente: elaboración propia, muestra de cálculo.

Tabla 2. **Porcentaje de remoción de coliformes fecales en cada tratamiento**

Tiempo (min)	Cantidad de catalizador (ppm)		
	500	750	1 000
5	40,6	48,5	17,9
10	49,6	44,7	51,3
15	29,2	43,9	42,0

Fuente: elaboración propia, muestra de cálculo.

Tabla 3. **Análisis de varianza para diseño cuadrado latino obtenido para la cantidad de coliformes fecales**

Fuente de variación	Grados de libertad	SS	S ²	F ₀	F _{α=0.05}
Tratamientos	2	2,18E10	1,09E9	7,54	19
Columnas	2	5,31E9			
Renglones	2	1,26E10			
Error	2	2,89E9	1,44E9		
Total	8	4,26E10			

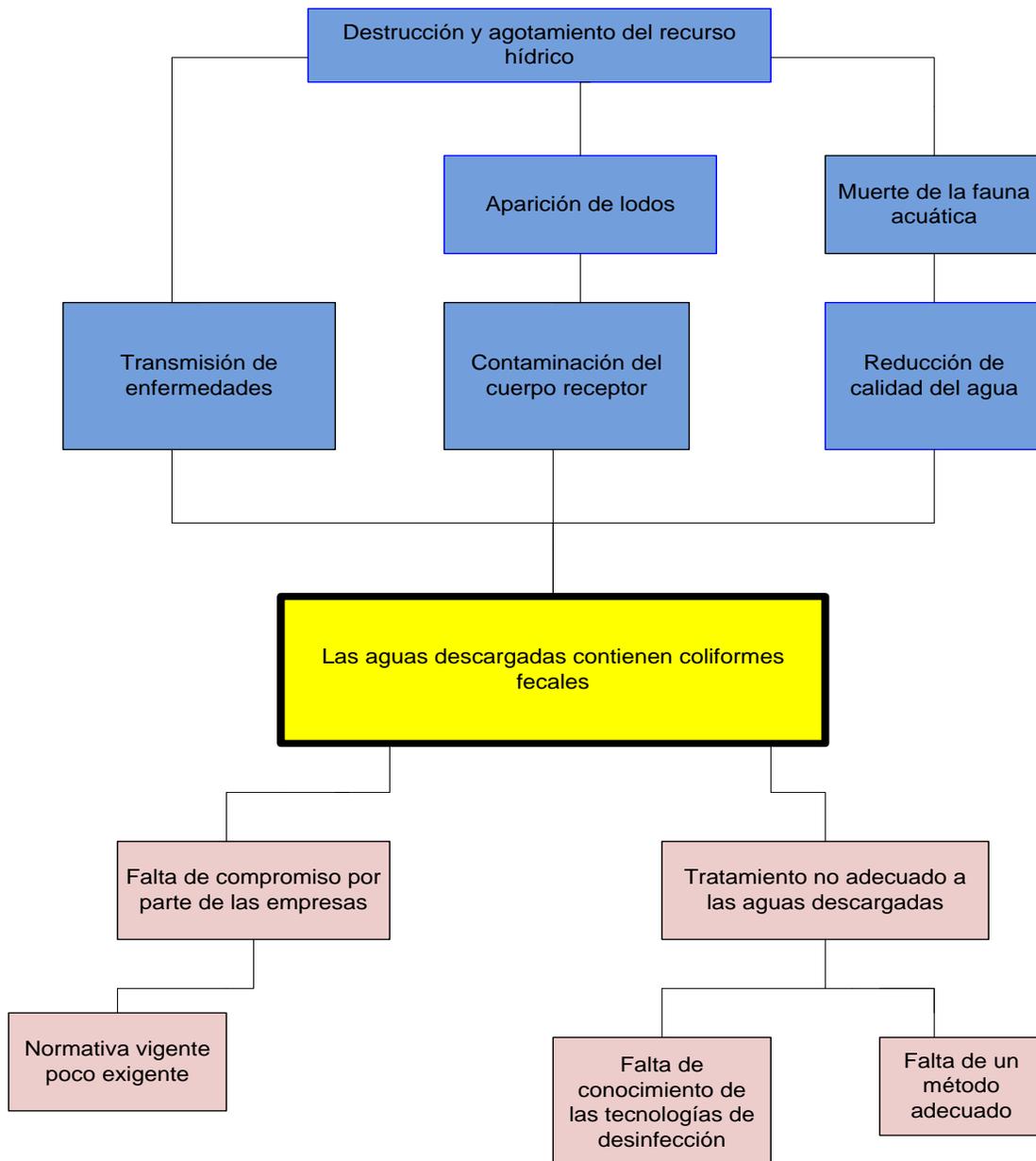
Fuente: elaboración propia, muestra de cálculo.

APENDICE 3. **Tabla de requisitos académicos**

	Área	Curso	Tema	Problema a resolver
Licenciatura en Ingeniería Química	Área de Química	Química 4	Reacciones óxido reducción	Reducción de coliformes fecales en el efluente de una granja avícola por medio de un proceso avanzado de oxidación
		Análisis Cuantitativo	Métodos volumétricos	
		Química Ambiental	Tratamiento de Aguas Residuales	
	Área de Especialización	Microbiología	Coliformes fecales, bacterias, virus	
		Procesos Químicos industriales	Procesos de oxidación avanzada, proceso de desinfección	
	Área de Ciencias básicas	Estadística	Control y manejo estadístico de datos	

Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 4. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Equipo utilizado

El reactor utilizado para llevar a cabo el procedimiento experimental constaba de un agitador electromagnético en la parte inferior, un *beaker* de 1 000 mL en los que se depositaron 700 mL de muestra de agua residual, que fue sometida a agitación continua para evitar la sedimentación del catalizador.

En la parte superior se colocó un cilindro de acero inoxidable con una lámpara UV-A de 20 Watts y longitud de onda de 360 nm.



Fuente: Neolabs S.A.

Anexo 2. Resultados del análisis microbiológico

Universidad de San Carlos de Guatemala

 Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia
 Laboratorio de Análisis Físicoquímicos y Microbiológicos LAFYM

1

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE AGUAS

No. de ingreso:	1856-1877	No. De muestra:	22 (veintidos)
Dirigido a:	Gerson Velásquez	Captadas por:	Personal ajeno a LAFYM
Lugar/dirección de captación:	Planta residual	Captación:	20/09/15
		Ingreso al laboratorio:	21/09/15
		Temperatura de ingreso:	Refrigeración
Tipo de muestra:	Residual	Inicio de análisis:	21/09/15
Envase:	Recipiente no proporcionado por LAFYM	Reporte final:	23/09/15

NO. INGRESO	LOTE	HORA DE CAPTACIÓN	COLIFORMES FECALES
1856	T 00	11:30 horas	677,000 NMP/100 mL
1857	C 1	12:05 horas	565,000 NMP/100 mL
1858	C 2	12:10 horas	404,000 NMP/100 mL
1859	C 3	12:15 horas	529,000 NMP/100 mL
1860	T 1.1	12:45 horas	369,000 NMP/100 mL
1861	T 1.2	12:50 horas	395,000 NMP/100 mL
1862	T 1.3	12:55 horas	373,000 NMP/100 mL
1863	T 2.1	13:25 horas	323,000 NMP/100 mL
1864	T 2.2	13:30 horas	301,000 NMP/100 mL
1865	T 2.3	13:35 horas	455,000 NMP/100 mL
1866	T 3.1	14:05 horas	676,000 NMP/100 mL
1867	T 3.2	14:10 horas	323,000 NMP/100 mL
1868	T 3.3	14:15 horas	399,000 NMP/100 mL
1869	R 1.1	14:45 horas	435,000 NMP/100 mL

3ª Calle 6-47 zona 1
 TeleFax: 22531319
 lafymusac@intelnnett.com



Continuación de anexo 2.

Universidad de San Carlos de Guatemala

 Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia
 Laboratorio de Análisis Físicoquímicos y Microbiológicos LAFYM

2

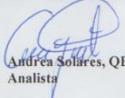
ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE AGUAS

NO. INGRESO	LOTE	HORA	COLIFORMES FECALES
1870	R 1.2	14:50 horas	288,000 NMP/100 mL
1871	R 1.3	14:55 horas	586,000 NMP/100 mL
1872	R 2.1	15:25 horas	374,000 NMP/100 mL
1873	R 2.2	15:30 horas	448,000 NMP/100 mL
1874	R 2.3	15:35 horas	305,000 NMP/100 mL
1875	R 3.1	16:05 horas	435,000 NMP/100 mL
1876	R 3.2	16:10 horas	336,000 NMP/100 mL
1877	R 3.3	16:15 horas	386,000 NMP/100 mL

*Métodos de Referencia: APHA-AWWA-WEF: *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, 21 ed.2005.*
 *Prohibida la parcial o total reproducción por el cliente u otra persona, sin la debida autorización escrita por parte del laboratorio LAFYM
 *Estos informe pertenecen única y exclusivamente a la muestra descrita, tal y como fue recibida en el laboratorio.

I. Nomenclatura utilizada:

NMP/100mL	Número Más probable por cien mililitros	NTG NPL	Norma Técnica Guatemalteca No Presenta Limite
-----------	---	------------	--


Andrea Solares, QB
 Analista




Licda. Ana E. Rodas de Garcia, QB
 Jefatura LAFYM

Licda. Ana E. Rodas de Garcia
 QUÍMICA BIÓLOGA
 COL. 2323

3ª. Calle 6-47 zona 1
 TeleFax: 22531319
 lafymusac@intelnnett.com

Fuente: Laboratorio de análisis físicoquímicos y microbiológicos (LAFYM).

