

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
<b>ELABORÓ</b>		<b>REVISÓ</b>		<b>APROBÓ</b>	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad	

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): NEIDY STEFANY

APELLIDOS: BENÍTEZ GUERRERO

NOMBRE(S): YESICA MILENA

APELLIDOS: ROLÓN RODRÍGUEZ

FACULTAD: CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA AMBIENTAL

DIRECTOR:

NOMBRE(S): GABRIEL

APELLIDOS: PEÑA RODRÍGUEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS CON ALUMINATO DE ESTRONCIO PARA LA REMOCIÓN DE TINTE AZUL IRIS DEL AGUA

### RESUMEN

En el presente proyecto se estudia la degradación del colorante azul directo 151 (azul oscuro N°17) por fotocátalisis en presencia de polvos de aluminato de estroncio dopados con europio y disprosio, aplicando luz UV-vis con una lámpara de longitud de onda 255 nm y potencia de 15 watt para este análisis se prepararon cinco muestras a concentraciones diferentes de colorante [60], [80], [100], [150] y [200] mg/l, tratada a cinco tiempos medidos en horas y dos concentraciones de catalizador (povos de aluminato de estroncio PAE) de [500 y 1000] mg/l.

PALABRAS CLAVES: Fotocátalisis, Remoción, Colorantes, Oxidación, Aluminato de estroncio, Dopado, Europio, Disprosio.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 106 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 13 CD ROOM: 1

APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS CON ALUMINATO DE ESTRONCIO PARA LA  
REMOCIÓN DE TINTE AZUL IRIS DEL AGUA.

NEIDY STEFANY BENÍTEZ GUERRERO  
YESICA MILENA ROLÓN RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE  
PLAN DE ESTUDIOS INGENIERÍA AMBIENTAL  
CÚCUTA  
2021

APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS CON ALUMINATO DE ESTRONCIO PARA LA  
REMOCIÓN DE TINTE AZUL IRIS DEL AGUA.

NEIDY STEFANY BENÍTEZ GUERRERO

YESICA MILENA ROLÓN RODRÍGUEZ

Trabajo de grado, tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental

Gabriel Peña Rodríguez

Docente de planta

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE  
PLAN DE ESTUDIOS INGENIERÍA AMBIENTAL  
CÚCUTA

2021

## Acta de sustentación

### ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO

**FECHA:** 23 DE FEBRERO DE 2021

**HORA:** 08:00

**LUGAR:** PLATAFORMA MEET

**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA AMBIENTAL

**TÍTULO:** "APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS CON ALUMINATO DE ESTRONCIO PARA LA REMOCIÓN DE TINTE AZUL IRIS DEL AGUA"

**MODALIDAD:** INVESTIGACIÓN

**JURADOS:** JANET BIBIANA GARCÍA MARTÍNEZ  
MARTHA TRINIDAD ARIAS PEÑARANDA  
JOSÉ MANUEL VILLAMIZAR IBARRA


**DIRECTOR:** GABRIEL PEÑA RODRÍGUEZ


NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACIÓN
YESICA MILENA ROLÓN RODRÍGUEZ	1650690	4,3
NEIDY STEFANY BENÍTEZ GUERRERO	1650725	4,3

**OBSERVACIONES:** APROBADO


**FIRMA DE LOS JURADOS:**

  
-Janet Bibiana García Martínez-

  
-Martha Trinidad Arias Peñaranda-

  
-José Manuel Villamizar Ibarra-

Vo.Bo. Coordinador Comité Curricular

  
JUDITH YAMILE ORTEGA CONTRERAS



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA  
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN  
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,

Señores  
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS  
Cúcuta Norte de Santander

Cordial saludo:

NEIDY STEFANY BENÍTEZ GUERRERO y YESICA MILENA ROLÓN RODRÍGUEZ identificada(s) con las C.C. N° 1090509224 y 1090494884 respectivamente, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado "APLICACIÓN DE FOTOCATÁLISIS CON ALUMINATO DE ESTRONCIO PARA LA REMOCIÓN DE TINTE AZUL IRIS DEL AGUA" presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de INGENIERO AMBIENTAL; autorizo(amos) a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que "los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Neidy Stefany Benítez  
1090509224

  
\_\_\_\_\_  
1090494884

## **Dedicatoria**

Quiero expresar mi agradecimiento principalmente a Dios por darme salud, sabiduría, entendimiento y perseverancia para no abandonar mis metas a pesar de las dificultades que se me presentaron durante toda la etapa de formación.

A mi familia por estar presentes siempre en las situaciones de mayor adversidad infundiéndome aliento para continuar cada día con mis proyecciones de vida por guiarme para seguir siempre encaminada sin desviar la mirada de sus enseñanzas de valores y moral.

A mi madre por su apoyo incondicional, por enseñarme con su ejemplo de mujer dedicada y trabajadora a luchar para conseguir mis sueños, siendo una persona independiente y proactiva; por mostrarme el lado real de la vida en el que todo se consigue mediante la suma de pequeños esfuerzos.

Al docente Gabriel Peña Rodríguez por su dedicación, paciencia y compromiso durante esta etapa de investigación, por compartir su conocimiento para complementar mi formación académica.

A todas las personas que de una u otra forma estuvieron presentes durante mi proceso de aprendizaje, a mi amiga y compañera de investigación por sus consejos y por compartir conmigo cada experiencia generando un crecimiento continuo, tanto personal como profesional.

## Contenido general

Introducción	14
1. Aplicación de Fotocatálisis con Aluminato de Estroncio Para la Remoción de Tinte Azul Iris del Agua.	16
1.1. Planteamiento del Problema	16
1.2. Formulación del Problema	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. General	18
1.3.2. Específicos	18
1.4. Justificación	18
1.5. Delimitación	20
1.5.1. Operativa	20
1.5.2. Conceptual	20
1.5.3. Temporal	20
2. Marco Referencial	21
2.1. Antecedentes	21
2.2. Marco Teórico	25
2.3. Propiedades de los PAE	31
2.4. Propiedades de la Lámpara	33
2.5. Propiedades del Colorante	36
2.6. Reacciones Químicas.	37
2.6.1. Pasos de la Reacción Catalítica	38
2.7. Orden de la Reacción Fotocatalítica.	38
2.8. Ecuación para Cálculo de Banda de Energía Prohibida.	40
2.9. Marco Conceptual	41
2.9.1. Agua.	41

2.9.2. Colorante.	42
2.9.3. Contaminación	42
2.9.4. Agua Residual	42
2.9.5. Tratamiento de Agua Residual	42
2.9.6. Fotocatálisis	43
2.9.7. Aluminato de Estroncio	43
2.9.8. Fotoluminiscencia	43
2.10. Marco Legal	44
3. Diseño Metodológico	47
3.1. Tipo de Investigación	47
3.2. Metodología	47
3.3. Estructura del Diseño Metodológico	48
Etapa I.	49
Etapa II.	49
Etapa III.	53
Etapa IV.	54
Etapa V.	55
Etapa VI.	56
3.4. Formulas Aplicadas	56
3.4.1. Cálculo de Dilución del Iris	56
3.4.2. Cálculo de Cantidad de PAE	56
3.4.3. Ecuaciones para el Cálculo de Efectividad de Remoción	57
3.4.4. Ecuación de Calibración	57
3.4.5. Ecuación de Concentración Real en el Tiempo.	58
3.4.6. Rapidez de Degradación (C/Co Vs tiempo).	58
3.4.7. Ecuación orden de Reacción Fotocataitica	59
4. Presentación de Resultados	60
4.1. Objetivo 1	60
4.1.1. Caracterización Química, Estructural y Morfológica Reportado por la UPTC	61

4.2. Objetivo 2	66
4.2.1. Potencial de Hidrogeno (pH)	69
4.2.2. Solidos Disueltos Totales (TDS)	71
4.2.3. Conductividad	72
4.3. Objetivo 3	75
5. Conclusiones	85
6. Recomendaciones	86
Referencias	87

## Lista de Tablas

Tabla 1. Consumo de agua en procesos industriales	18
Tabla 2. Tamaño de partículas	33
Tabla 3. Propiedades del aluminato de estroncio	34
Tabla 4. Normativa Colombiana	45
Tabla 5. Definición de tipo de factores	52
Tabla 6. Matriz experimental	53
Tabla 7. Concentraciones de colorante	56
Tabla 8. Concentraciones de los polvos de aluminato de estroncio	57
Tabla 9. Óxidos en aluminato de estroncio	63
Tabla 10. Micrografía, espectro y resultados cuantitativos de la partícula	66
Tabla 11. PAE con MEB a 2000X y 5000X	67
Tabla 12. Espectro de absorción y curva de calibración azul directo 151	69
Tabla 13. Ajuste de reacción con [60 mg/L] de colorante	70
Tabla 14. Ajustes de primer y segundo orden	71
Tabla 15. pH desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [500]	72
Tabla 16. pH desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [1000]	72
Tabla 17. TDS desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [500]	73
Tabla 18. TDS desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [1000]	73
Tabla 19. Conductividad desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [500]	75
Tabla 20. Conductividad desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [1000]	75
Tabla 21. Eficiencia de remoción	78
Tabla 22. Gráficas de remoción del colorante con PAE	82
Tabla 23. % eficiencia de remoción vs tiempo	83
Tabla 24. Reporte de absorbancias de acuerdo a la resolución 0631 del 2015	84
Tabla 25. Rapidez de degradación	85

## Lista de Figuras

Figura 1. Esquema del desarrollo de las reacciones por fotocatalisis	28
Figura 2. Esquema de un proceso fotocatalítico en una partícula de semiconductor	30
Figura 3. Esquema del mecanismo de emisión de luminiscencia.	31
Figura 4. Formas cristalográficas del SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	32
Figura 5. Proceso de excitación de un electrón	35
Figura 6. Radiaciones del espectro electromagnético	35
Figura 7. Tipos de luz UV	36
Figura 8. Partes de una lámpara fluorescente	37
Figura 9. Estructura molecular del colorante	38
Figura 10. Metodología	50
Figura 11. Esquema experimental	52
Figura 12. Prototipo para el tratamiento del agua	57
Figura 13. Espectro de fluorescencia	64

## **Lista de apéndices**

Apéndice A.	Registro de Fotográfica Preparación de Muestras	96
Apéndice B.	Registro Fotográfico Proceso de Tratamiento	98
Apéndice C.	Registro Fotográfico Pruebas de Absorbancia	108
Apéndice D.	Cálculos y Resultados Obtenidos	109

## Resumen

En el presente proyecto se estudia la degradación del colorante azul directo 151 (iris azul oscuro Nro. 17) por fotocátalisis en presencia de polvos de aluminato de estroncio dopados con europio y disprosio estos se obtuvieron de la empresa Novacolor S.A.S. quienes utilizaron el método de síntesis hidrotermal para su fabricación.

La decoloración y degradación del azul directo 151 se evalúa a través de la vía fotocatalítica aplicando luz UV-vis con una lámpara de longitud de onda 255 nm y potencia de 15 watt, para este análisis se prepararon cinco muestras a concentraciones diferentes de colorante [60], [80], [100], [150] y [200] mg/L, tratada a cinco tiempos medidos en horas y dos concentraciones de catalizador (povos de aluminato de estroncio PAE) de [500 y 1000] mg/L.

Mediante la aplicación de espectrofotometría UV-vis se obtuvieron los resultados de absorbancia para poder calcular la eficiencia de remoción en cada tratamiento y se alcanzaron valores del 100% en las muestras tratadas con PAE [500 mg/L] mientras que para las tratadas con [1000 mg/L] la eliminación del color no alcanzo el 100% en los tratamientos de mayor concentración de colorante debido al exceso de fotocatalizador y la intensidad constante de la radiación de la lámpara que puede provocar procesos de recombinación y disminuye la eficiencia de la reacción.

## Introducción

Los colorantes de alta concentración que se vierten en las aguas superficiales provienen principalmente de la industria de impresión y el teñido de textiles, ya que esta es una de las principales consumidoras de agua. Para contrarrestar este problema ambiental existen diversas metodologías de tratamiento, entre las cuales se encuentran las tecnologías de oxidación avanzada cuyo objeto es la degradación de los colorantes orgánicos por radiación de luz lo cual puede ocurrir básicamente a través de tres mecanismos: A) mediante un proceso de fotólisis inducida por energía de una fuente de radiación visible; B) mediante un proceso de fotosensibilización en el que la radiación visible excita electrones en el enlace  $\pi$  de la molécula de tinte. Estos electrones se inyectan en la banda de conducción del semiconductor y luego se oxida el tinte; C) Bajo la acción de la luz visible, los electrones son promovidos desde la banda de valencia a la banda de conducción del semiconductor a través de un proceso fotocatalítico convencional para generar sitios activos para la oxidación del tinte (García y Martínez- De la Cruz, 2010), para el caso del presente proyecto aplica el mecanismo C mediante la agregación de sustancias fotocatalizadoras para generar el rompimiento de las moléculas del contaminante en este caso el colorante azul directo 151 perteneciente a la familia azo que son los más consumidos y se caracterizan por la presencia de un grupo azo ( $-N = N-$ ) en la molécula que conecta al menos dos anillos aromáticos. El grupo azo tiene 6 electrones "móviles" (deslocalizados), que se deslocalizan del anillo aromático adyacente. Todos los compuestos azo están coloreados, pero no todos se pueden utilizar como colorantes (Sanz, 2020a).

En la presente investigación se realizará el tratamiento de aguas coloreadas con tinte iris azul oscuro (azul directo 151), usando fotocatalisis con luz ultravioleta y polvos de aluminato de estroncio (PAE) dopados con europio (Eu) y disprosio (Dy) preparados con el método

hidrotermal que consiste en una reacción heterogénea de sintetizar materiales inorgánicos en medios acuosos a una temperatura y presión superior a la del ambiente (Huang et al., 2019), contribuyendo en las tecnologías de oxidación avanzada en la remoción de colorantes en aguas. Para lo anterior se preparan muestras de agua en concentraciones de [60], [80], [100], [150] y [200] mg/l de tinte y de [500 y 1000] mg/l en PAE siguiendo lo reportado en la literatura Manrique et al. (2017a), se determina la eficiencia de remoción en función de la concentración de aluminato agregado y el tiempo de exposición a la luz ultravioleta mediante la determinación del color por absorbancia a través de espectrofotometría de UV-Vis para cada una de las muestras preparadas; adicionalmente se miden los parámetros como potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS) complementando el estudio. Con este trabajo se contribuirá en las innovaciones tecnológicas de tratamientos de aguas de efluentes de industrias de tinturado como alternativa para el mejoramiento en la calidad del agua.

# **1. Aplicación de Fotocatálisis con Aluminato de Estroncio Para la Remoción de Tinte Azul Iris del Agua.**

## **1.1. Planteamiento del Problema**

La industria textil ocasiona múltiples afectaciones ambientales entre las cuales la generación de aguas residuales es una de las más destacadas. Se considera que el 20% de aguas residuales de procedencia industrial en todo el mundo está relacionada con la confección de la ropa y 85% de estas con procesos de tintura de telas (Ruiz, 2019).

De los 200 mil millones  $m^3$  de agua disponible para la industria a nivel mundial, 2.5 mil millones de  $m^3$  es decir el 1.25% es destinada a las industrias textiles, esta agua queda altamente contaminada debido a los procesos realizados. Para la fabricación de una tonelada de producto textil se consume aproximadamente 200 toneladas de agua y del total de productos químicos utilizados el 90% son descargados una vez han cumplido su fin (Patarroyo, 2013a); esto se debe a que la mayoría de las industrias del sector textil no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales que permita reducir los impactos sobre las fuentes receptoras (Benavides, 2015).

En Colombia la industria textil juega un papel importante; usando variables cantidades de agua dependiendo del tipo de proceso por ejemplo en el teñido con colorantes dispersos, se utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto. En la tinción con colorantes reactivos, las cifras varían entre 125 y 170 litros por kilogramo de producto (Patarroyo, 2013b); el mayor consumo de agua se realiza por la industria textil de tintura, como se observa en la tabla 1.

**Tabla 1***Consumo de agua en procesos industriales*

<b>Proceso industria textil</b>	<b>Consumo de agua en %</b>
<b>Tintura</b>	52
<b>Pretratamiento</b>	41
<b>Refrigeración</b>	6
<b>Acabados</b>	1

*Nota.* Adoptado de “Procesos de estabilización de residuos generados en la industria textil en Colombia mediante lodos activados” (p. 6), por E. Patarroyo 2013.

Esta industria usa diferentes tipos de colorantes artificiales, ya que existen aproximadamente 10.000 variedades en el mercado, generando aguas residuales altamente tinturados de las cuales del 10 al 15% son vertidas a los efluentes (Patarroyo, 2013c).

La presencia de estos tintes en los cuerpos de agua inhibe la inserción de la luz solar, retardando la actividad fotosintética y los procesos de crecimiento en la biota. Su remoción del agua se hace difícil debido a las complejas estructuras de los tintes de allí la necesidad de avanzar en investigaciones y tecnologías para el tratamiento de estos efluentes (Ria y Ritu, 2013). Como es el caso del presente trabajo que busca demostrar la efectividad de remoción generando mínimos residuos.

## **1.2. Formulación del Problema**

¿Cuál será el porcentaje de remoción de tinte iris azul usando fotocátalisis con aluminato de estroncio?

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. General***

Estudiar la efectividad de remoción del colorante iris azul del agua usando fotocátalisis (UV) con aluminato de estroncio dopado con europio (Eu) y disprosio (Dy), para contribuir a la innovación en las tecnologías de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas coloreadas.

#### ***1.3.2. Específicos***

- Identificar las propiedades químicas, morfológicas y estructurales de los polvos a base de aluminato de estroncio mediante una revisión de fuentes primarias y secundarias, como base científica para la verificación de la incidencia de las características del polvo con la remoción.

- Desarrollar pruebas experimentales aplicando fotocátalisis UV con polvos de aluminato de estroncio a escala de laboratorio teniendo en cuenta los parámetros establecidos para la obtención de las relaciones entre el tiempo y concentraciones del polvo y del colorante.

- Establecer las absorbancias de las muestras de agua en el laboratorio de Calidad Ambiental mediante Espectrofotometría UV-vis para la determinación de la eficiencia de remoción de colorante.

### **1.4. Justificación**

Debido a la necesidad de remover la materia orgánica, sólidos no eliminados, el color presente en las aguas residuales y dar cumplimiento a los parámetros (pH, DQO, DBO, Color real) establecidos en la resolución 0631 de 2015 para la fabricación de productos textiles; se requieren de tratamientos primarios, secundarios y avanzados. El tratamiento de las aguas coloreadas de estos efluentes es un desafío tecnológico en los procesos de remoción debido a la complejidad de las mezclas de colorantes y las sustancias empleadas para los acabados. Se

considera que la descarga mundial de aguas tinturadas es de aproximadamente 280.000 toneladas de allí la importancia de realizar estudios que innoven en sistemas de depuración completa como es el caso de coagulación-floculación, adsorción con carbón activo, tecnologías de membrana, tratamiento con ozono, estos procesos se catalogan como las más ampliamente utilizadas en la industria textil hasta el momento; también existen nuevas tecnologías para la eliminación de color que se dividen en: coagulantes naturales, nuevos adsorbentes, tratamientos enzimáticos, reactores anaerobios, técnicas electroquímicas y por último procesos de oxidación avanzada, sobre el cual se fundamenta el presente trabajo, debido a se basa en la generación de radicales  $\cdot\text{OH}$ ; estos procesos incluyen las reacciones de Fenton ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ) y Foto-Fenton ( $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ), sistemas basados en  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{luz UV}$  y fotocatalisis heterogénea  $\text{UV}/\text{TiO}_2$  (Vilaseca et al. 2015); siendo la fotocatalisis con reactores de UV y  $\text{TiO}_2$  uno del tratamiento más efectivo para la eliminación de colorantes presentes (Manrique et al., 2017b), gracias su capacidad de generar la excitación de un sólido (fotocatalizador), semiconductor de banda ancha, a través de la emanación con luz de una energía superior o igual a su band-gap, provocando el desplazamiento de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción y conformando pares electrón-hueco que pueden saltar a la superficie del catalizador y reaccionar con especies adsorbidas o próximas a la superficie (Faraldos, 2016a). Los estudios de fotocatalisis con PAE dopados con Eu y Dy para el tratamiento son escasos y se desaprovechan sus propiedades fotoluminiscentes que permitan la remoción de los colorantes presentes en el agua lo cual representaría un avance significativo en las tecnologías de oxidación avanzada.

El plan de estudios de ingeniería ambiental de la universidad Francisco de Paula Santander contiene dentro de sus líneas de investigación y acción la línea de saneamiento básico con direccionamiento al tratamiento de aguas residuales contando a su vez con laboratorios de

calidad ambiental acreditados que permiten el desarrollo de estudios referentes a la calidad del agua y el tratamiento de la misma, desarrollando y aplicando así los conceptos y experiencias aprendidas durante el proceso educativo.

## **1.5. Delimitación**

### ***1.5.1. Operativa***

Este proyecto se desarrollará a escala de laboratorio y se utilizarán equipos de pesado, medición (multiparámetro), mezcla (agitador magnético) y lámpara para tratamiento fotocatalítico; además se usarán otros materiales de laboratorio; se implementará el método de análisis de espectrofotometría para evaluar color real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm) establecidas por la resolución 0631 del 2015.

### ***1.5.2. Conceptual***

Para el desarrollo de este proyecto se tienen en cuenta las tecnologías de oxidación avanzada por proceso fotocatalítico, se toman en cuenta bases teóricas sobre la fotocatalisis y espectrofotometría para el tratamiento de aguas tinturadas.

### ***1.5.3. Temporal***

El tiempo estimado para la ejecución y terminación del proyecto es de aproximadamente 4 meses.

## **2. Marco Referencial**

### **2.1. Antecedentes**

**Edison Gil Pavas, José Medina, Izabela Dobrosz-Gómez, Miguel Á. Gómez**  
**“Degradación de Colorante Amarillo 12 de Aguas Residuales Industriales utilizando Hierro Cero Valente, Peróxido de Hidrógeno y Radiación Ultravioleta” (2016).**

Este estudio busca optimizar un reactor de lecho fluidizado para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil; usando el proceso Fenton heterogéneo, con hierro cero Valente (ZVI) en estado metálico. El agua objeto de estudio es la descargada de una industria del sector textil, con coloración amarilla debido a la presencia del colorante azoico Y12; se realiza la caracterización físico-química del agua teniendo en cuenta los parámetros más significativos. Como resultado se obtuvo que las variables más significativas a mejorar para optimizar la remoción en el reactor son el pH (3-5), la cantidad de ZVI (a mayor cantidad mayor degradación) y el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ya que este tiene una interacción (de acuerdo con su concentración) positiva con el PH. El reactor mostro eficacia y eficiencia en el tratamiento, logrando la degradación del colorante en un 99,28% y de la DQO en un 80 %, luego de 80 minutos de reacción. (Pavas et al. 2016).

**Emily Andrea Soler Uribe, Winny Jimena Prieto Bernal “Evaluación de una propuesta de un sistema de tratamiento para el agua residual industrial generada en una empresa de Saborizantes” (2019)**

Este documento presenta la propuesta realizada a modo de proyecto para la implementación de un sistema de tratamiento de efluentes del proceso productivo de saborizantes artificiales; se presenta el diagnóstico inicial del agua a tratar teniendo en cuenta los parámetros criterio establecidos de acuerdo con la resolución 631 del 2015 para el control de los

vertimientos a los cuerpos hídricos en este caso. Se realizaron las pruebas piloto con simulaciones a escala de laboratorio analizando las ventajas y desventajas del sistema propuesto, estableciendo las condiciones de operación, los reactivos a usar y sus concentraciones para lograr la remoción eficaz de los contaminantes presentes en el efluente. Una vez se obtuvieron las especificaciones de operación y de reactivos se realiza el diseño del sistema de tratamiento con las dimensiones de los equipos necesarias a partir de este diseño se estipulan los costos de inversión, manejo y caracterización de los efluentes de la alternativa propuesta (Soler y Prieto, 2019).

**Nadia Bougdour, Rachid Tiskatine, Idriss Bakas, Ali Assabbane “La degradación fotocatalítica de aguas residuales textiles industrial usando  $S_2 O_8^{2-} / Fe^{2+}$  proceso” (2019).**

Este estudio se basó principalmente en la remoción de color y mineralización del agua residual de una industria textil de Marruecos utilizando las tecnologías de oxidación avanzada para comprobar el rendimiento de remoción con  $S_2 O_8^{2-} / Fe^{2+}$ , un reactor y una lámpara de alta presión de mercurio con luz UV, la muestra de agua para analizar tuvo ajustes con ácido sulfúrico hasta alcanzar un pH de 3, luego se realizó un primer ensayo con diluciones de 3, 5, 8 veces para remover el color y DQO, un segundo ensayo de concentración del  $S_2 O_8^{2-} / Fe^{2+}$  y tiempo para la remoción de DQO, la cual se obtuvo para el primer ensayo de diluciones a 3, 5, 8 veces una remoción de color del 45%, 69% y 100% respectivamente en una hora y una remoción de DQO del 31,5%, 49%, 80% respectivamente en 180 minutos; en el segundo ensayo hubo mayor remoción de color y DQO a una concentración de 4:0,2 del  $S_2 O_8^{2-} / Fe^{2+}$ , también se observa que la remoción de DQO aumenta con el tiempo hasta lograr un 87% en los 180 minutos (Bougdour et al. 2019).

**M.R. Al-Mamuna, S. Kader, M.S. Islamb, M.Z.H. Khana “Mejora de la actividad fotocatalítica y aplicación de la fotocatalisis UV-TiO<sub>2</sub> en el tratamiento de aguas residuales textiles: una revisión” (2019).**

Este artículo trata sobre una revisión documental de las técnicas fotocatalizadoras de TiO<sub>2</sub> en nanopartícula bajo la irradiación de la luz UV dentro del documento se mencionan los mecanismos de la oxidación fotocatalítica UV-TiO<sub>2</sub>, el ensamblaje de TiO<sub>2</sub> fotocatalizador de conductores bajo luz UV, las estrategias para mejorar la fotoactividad de TiO<sub>2</sub>, el dopaje de TiO<sub>2</sub> y una aplicación de textiles para tratamiento de aguas residuales dividido en metalizado o no metalizado y dopaje de metal y no metal, también menciona la degradación fotocatalítica de compuestos de colorantes orgánicos mediante el uso de UV-TiO<sub>2</sub> y la degradación fotocatalítica de compuestos fenólicos mediante el uso de UV-TiO<sub>2</sub> todo con el fin de mejorar la calidad del agua que se descarga en los ecosistemas acuáticos (Al-Mamuna et al. 2019).

**Nupur Bahadura, Nipun Bhargavaa “Novedoso tratamiento fotocatalítico a escala piloto de aguas residuales de la industria textil y de teñido para lograr la calidad del agua de proceso y permitir una descarga cero de líquidos” (2019).**

El presente artículo trata sobre el tratamiento de aguas residuales de una unidad de teñido de algodón en Andhra Pradesh- India, utilizando un método experimental con una planta piloto de tratamiento fotocatalítico, su proceso para depuración del agua se divide en tres etapas: pretratamiento; posteriormente inicia la segunda etapa con una aireación, seguidamente la muestra pasa por un reactor fotocatalítico con radiación de luz UV; la última etapa es filtración por membrana de osmosis inversa. Los resultados del estudio fueron los siguientes en la etapa 1 el tratamiento removió el color y redujo TDS, en la segunda y tercera etapa se observó la remoción completa del color, la reducción del material orgánico con un 91% el DQO y un 95%

DBO también se observó la eliminación completa de dureza y nitrógeno total, la poca generación y la no presencia de elementos tóxicos en los lodos teniendo un valor 0,4 kg al final del proceso (Bahadur y Bhargava, 2019).

**“Comportamiento fotocatalítico de los aluminatos de estroncio co-dopados con europio y disprosio sintetizados por reacción hidrotérmica en la degradación del azul de metileno” (2017).**

La presente investigación revela la eficiencia del aluminato de estroncio frente a la del  $\text{TiO}_2$  para la remisión del colorante en una muestra de agua con azul de metileno, además señala la comparación de unos de los métodos que se utilizan para preparar y sintetizar el aluminato de estroncio entre estos se encuentra el método hidrotérmico y el sol-gel la cual se caracterizan por trabajar a bajas y altas temperaturas respectivamente; en la descomposición fotocatalítica del azul del metileno se realizó en una solución de agua con colorante, como resultados se obtuvo que las propiedades químicas de los aluminatos caracterizados por SEM-EDX, fotoluminiscencia y DRS visible a los rayos UV fueron similares entre los dos métodos también se demostró que la actividad fotocatalítica del aluminato de estroncio en la remoción del colorante fue más eficiente que el fotocatalizador  $\text{TiO}_2$  esto debido a que el aluminato de estroncio tiene mayor fotosensibilidad (Park, 2018a).

**Suellen Battiston, Caroline Rigo, Eric da Cruz Severo, Marcio Antonio Mazutti, Raquel Cristine Kuhn, André Gündel, Edson Luiz Foletto “Síntesis de espinela de aluminato de zinc ( $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ ) y su aplicación como fotocatalizador” (2014).**

El objetivo del presente trabajo fue procesar partículas de  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$  mediante la coprecipitación usando el amoníaco como sustrato para la precipitación y sometándolo seguidamente a tratamiento térmico; evaluando la efectividad del proceso para la degradación en

colorantes de curtiduría bajo emisión solar. Para el cumplimiento del objetivo se usaron como catalizadores el nitrato de aluminio [ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , grado analítico] y el nitrato de zinc [ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , grado analítico] como fuente de aluminio y zinc, respectivamente. Con los resultados obtenidos se demostró que la eficiencia del proceso está íntimamente relacionada con la concentración del colorante en la solución lográndose una mayor eficiencia de remoción con la concentración de [80mg/L] (Battiston et al., 2014).

## 2.2. Marco Teórico

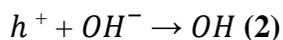
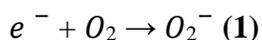
Los POA's (procesos de oxidación avanzada) tienen como fundamento sucesiones fisicoquímicas capaces de transformar la estructura química de los compuestos orgánicos que generan impactos negativos en el medio, estos implican la creación y empleo de especies transitorias potentes, primordialmente el radical hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ) el cual se puede crear por medios fotoquímicos entre los cuales se incluye la incidencia de la luz natural (solar) u otras formas de energía, y contienen mayor capacidad para la oxidación de la materia orgánica. Diferentes POA's como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, usan reductores químicos que posibilitan cambios en contaminantes tóxicos pocos susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados. Los POA's se clasifican en procesos no fotoquímicos y fotoquímicos. Los procesos relacionados con los POA's pueden ser más termodinámicos y tener una mayor velocidad de oxidación debido a la presencia de radicales, principalmente el radical hidroxilo,  $\text{OH}\cdot$ , ya que contiene propiedades idóneas para combatir virtualmente a todos los procesos orgánicos y reaccionar  $10^6 - 10^{12}$  veces más rápido que oxidantes alternativos (Torres, 2013a).

La fotocatalisis es una de las fotorreacciones solares, más estudiada y se aplica en diferentes niveles y en distintas industrias como el tratamiento de agua. En los últimos años, su

investigación se ha centrado en el uso de materiales semiconductores como fotocatalizadores para la eliminación de especies orgánicas e inorgánicas de los sistemas de fase acuosa o gaseosa para la limpieza del medio ambiente, tratamiento de agua potable, y el tratamiento de aguas residuales industriales (Borges et al., 2016).

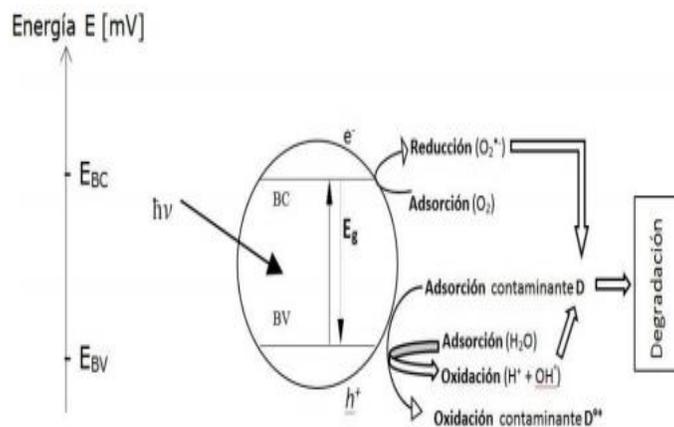
Para el proceso fotocatalítico debe haber al menos dos reacciones que ocurren simultáneamente, la primera que implica la oxidación de agujeros fotogenerados, y la segunda que implica la reducción de los electrones fotogenerados. Ambos procesos deben equilibrarse precisamente para que el propio fotocatalizador no sufra cambio, lo cual es, después de todo, uno de los requisitos básicos para un catalizador (Fujishima et al., 2008).

A través de reacciones de reducción y oxidación, se generan especies de alto poder oxidante, principalmente radicales hidroxilos ( $\cdot\text{OH}$ ) y súper óxido  $\text{O}_2^-$ . Por último, son estos radicales los que llevan a cabo el proceso de oxidación de las moléculas del contaminante.



“Debido a que el contaminante por sí mismo no es capaz de capturar fotones, se requiere el sensibilizador como absorbedor de la energía radiante y catalizador de la reacción de oxidación del contaminante. La aplicación de radiación solar para la realización de procesos fotoquímicos, solo es posible mediante catálisis homogénea o heterogénea, usando cationes hierro o dióxido de titanio respectivamente” (Pey, 2008). La técnica aplicada industrialmente se basa en la utilización de la fracción del ultravioleta cercano (UV-A) de la radiación solar mediante la acción de un catalizador que genera radicales hidroxilos ( $\cdot\text{OH}^-$ ) que poseen una

potente acción oxidante. En ciertas condiciones de presión y temperatura estos radicales mineralizan la materia orgánica a  $\text{CO}_2$  y agua (Castells et al. 2009).



**Figura 1.** Esquema del desarrollo de las reacciones por fotocatalisis

*Nota.* Adoptado de Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango México, Instituto Politécnico Nacional.

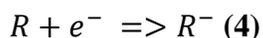
Según Suri et al. (1993) en la figura 1, se observa la formación del par electrón–hueco que se alcanza por la emisión de luz de alta energía o por la radiación de calor, de esta manera, la energía de los fotones absorbidos ( $E_p$ ) debe corresponder, por lo menos, a la energía de la Apertura de Banda ( $E_g$ ) del semiconductor respectivo, o sea, si conocemos la energía de la Apertura de Banda, entonces la máxima longitud de onda ( $\lambda$ ) necesaria para la excitación de un electrón podrá calcularse por la siguiente relación:

$$E_g \leq E_p = h\nu = h(c/\lambda) \quad (3)$$

En donde  $h$  representa la constante del efecto cuántico de Planck, “ $c$ ” representa la velocidad de la luz y “ $\lambda$ ” la frecuencia de la radiación electromagnética (Hering et al., 1989). Las cargas fotogeneradas ocupan el potencial de la banda de conducción y de la banda de valencia y poseen, además, un movimiento libre en el interior de los semiconductores. Es por ello que éstas se encuentran en la posición de migrar hacia la superficie del catalizador y ahí se localizarán,

hasta que el semiconductor entre en contacto con el agua residual, expuesta al tratamiento, momento en el cual las cargas pueden ser transportadas hacia moléculas y iones, en forma de una reacción redox, permaneciendo en su forma adsorbida.

El fundamento termodinámico para el intercambio de cargas radica en que los potenciales de oxidación de las partículas adsorbidas yacen en el interior de la apertura de banda del semiconductor y debido a ello, la molécula receptora R, oxígeno en este caso, será reducida a través del transporte de los electrones de la banda BC hacia ella, conforme a la reacción siguiente:



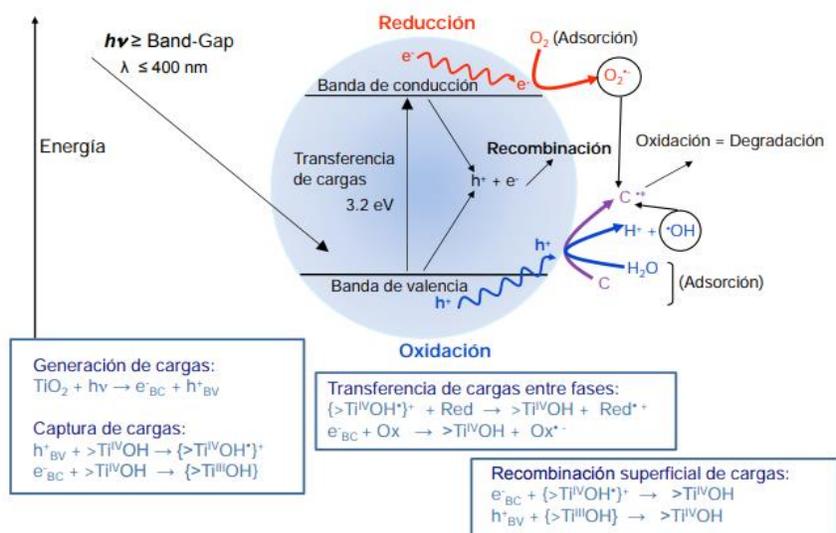
De la misma manera completan la reacción las otras moléculas (D) con la banda de valencia (BV), en ese caso y de acuerdo a la reacción (5), las moléculas transfieren un electrón al semiconductor.

(5)

Si al catalizador se le aplica una radiación de intensidad constante durante la descomposición de la materia orgánica, entonces las reacciones (4) y (5) se desarrollan con la misma velocidad para alcanzar la neutralidad de carga de las partículas del semiconductor y sobreviene, por ese motivo, la disminución de las concentraciones de carga en la superficie hacia las moléculas donadoras o receptoras apropiadas, no obstante la tendencia a la reducción de la velocidad de uno de estos dos procesos, con lo cual se acumulan las cargas no consumidas en el interior del semiconductor. Lo anterior conduce a una “recombinación” de las cargas, anteriormente divididas, liberando calor en forma de radiación o de energía térmica, de acuerdo a la reacción siguiente:



Como se muestra en la figura 2, el proceso fotocatalítico heterogéneo se basa en la excitación de un sólido (fotocatalizador), que suele ser un semiconductor de banda ancha, como el  $\text{TiO}_2$ , que se excita irradiando luz con energía igual o mayor que su band-gap (Faraldos, 2016b).

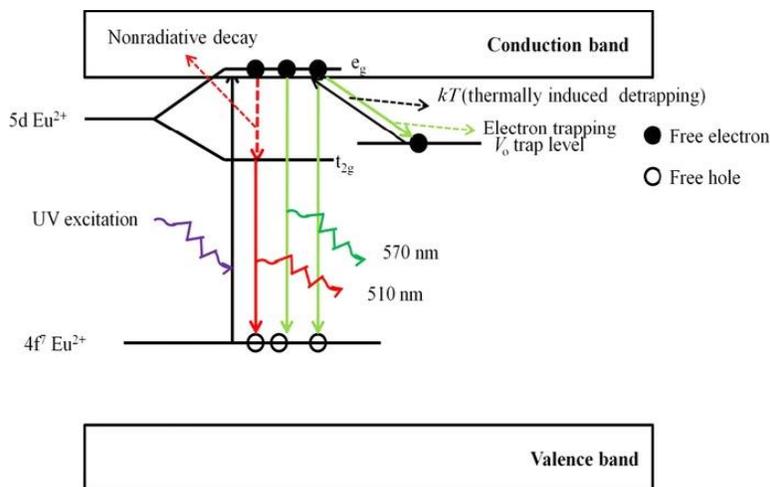


**Figura 2.** Esquema de un proceso fotocatalítico en una partícula de semiconductor

*Nota.* Adoptado de “Fotocatálisis: nanomateriales para combatir la contaminación y obtener energía” (p. 9), por M. Faraldos, 2016.

Los polvos de aluminato de estroncio dopados con europio y disprosio son uno de los materiales fotocatalíticos que se están empleando recientemente para el tratamiento de aguas, su mecanismo de fosforescencia  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}$  fue planteado inicialmente por Abbruscato en 1971; Matsuzawa y colaboradores, quienes lo propusieron por primera vez para el fósforo dopado con  $\text{Dy}^{3+}$  en 1996. A partir de este se explica la luminosidad en Aluminatos y silicatos dopados con Eu y Dy. La fosforescencia resulta de la recombinación de electrones atrapados alrededor del sitio  $\text{Eu}^{3+}$  fotogenerado y se emite a 520 nm. El co-dopante  $\text{Dy}^{3+}$  mejora la fosforescencia aumentando el número y la profundidad de las trampas de electrones. El diagrama esquemático del mecanismo de captura de electrones propuesto se muestra en la figura 3, el análisis de brillo

de pico de termoluminiscencia realizado por Nakazawa y Machida; Yamamoto y Matsuzawa que respalda aún más este mecanismo (Anesh et al., 2014a).



**Figura 3.** Esquema del mecanismo de emisión de luminiscencia.

*Nota.* Adoptado de “Developments in  $\text{Eu}^{+2}$ -Doped Strontium Aluminate and Polymer/Strontium Aluminate Composite”, por Anesh et al., 2014.

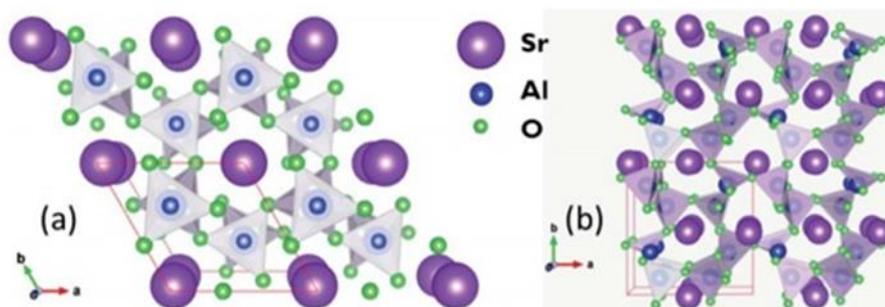
En los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas de síntesis, como precipitación química, solvotermal, tratamiento con microondas, tratamiento hidrotérmal (la síntesis de este tratamiento se ha usado para procesar los aluminatos con dopaje en Eu y Dy para impedir posibles procesos de molienda (Rojas, 2015a)), coprecipitación hidrotérmal, síntesis láser y rutas de microemulsión para preparar fósforos con diferentes propiedades. La morfología de los fósforos recolectados por estos métodos tiene una forma irregular y se están realizando más investigaciones para obtener materiales luminiscentes morfológicamente claros (Anesh et al., 2014b).

El tratamiento hidrotérmal es un método que abarca una serie de técnicas donde a temperaturas y presiones mayores a las ambientales se desarrolla las reacciones químicas ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y 1 atm). Esta técnica tiene numerosas posibilidades de síntesis, para crear un compuesto MOF (Metal Organic Framework, un polímero cristalino con nanoporos, que combina iones metálicos

inorgánicos con polímeros orgánicos, para formar una estructura tridimensional, con enlaces covalentes (Bolufer, 2014)) se cuenta con diferentes métodos, pero la más frecuente es la que se desarrolla a temperaturas relativamente bajas ( $< 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Por debajo de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , este método de síntesis es llamado hidrotermal clásico, y para temperaturas que superan los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  el método es denominado solvotermal (Bazan et al., 2012a).

### 2.3. Propiedades de los PAE

La mayoría de los aluminato de estroncio  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  se caracterizan por tener una estructura de espinela ( $\text{AB}_2\text{X}_4$ ), pero también tiene una estructura tridimita. Este comportamiento se debe al hecho de que el tamaño del catión Sr ( $1,18\text{ \AA}$ ) es demasiado grande y no se puede formar la estructura de espinela. La estructura de tipo tridimita consta de capas de tetraedro  $[\text{AlO}_4]$  5, que comparten los vértices que forman un anillo de seis miembros. Los cationes  $\text{Sr}^{2+}$  están ubicados en la cavidad hexagonal de la estructura. Estos cationes pueden ocupar dos posiciones cristalinas diferentes y tener coordinación VI+I.



**Figura 4.** Formas cristalográficas del  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ .

*Nota.* (a) estructura monoclinica, (b) estructura hexagonal. Adoptado de “Diseño y síntesis de materiales nanoestructurados basados en aluminatos de estroncio con propiedades fotoluminiscentes” (p. 15), por R. Rojas, 2015.

El aluminato de estroncio existe en dos formas cristalográficas: la monoclinica y la hexagonal. La fase monoclinica (N) posee un grupo espacial P21 ( $a=8.447\text{ \AA}$ ,  $b=8.816\text{ \AA}$ ,

$c=5,163 \text{ \AA}$ ,  $\beta=93,43^\circ$ ) y es estable a baja temperatura como se muestra en la figura 4 en la parte (a) y la fase hexagonal se observa en la fase (b), grupo (H) espacial P6322 ( $a=5,140 \text{ \AA}$ ,  $c=8,462 \text{ \AA}$ ) es la fase de alta temperatura y aún no está del todo descrita (Rojas , 2015b).

Los PAE dopados con europio y disprosio ( $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ ) tienen diferentes áreas de aplicación gracias a su fosforescencia, su capacidad fotocatalítica y sus propiedades fotosensibles característica importante, en el contexto de desarrollo de este proyecto, puesto que permite su aplicación en procesos de oxidación avanzada (Park, 2018b). Los PAE suelen presentar un gran tamaño de cristal con diferentes tamaños de partícula entre su estructura como se presenta en la tabla 2 y una densidad de  $3.557 \text{ g / cm}^3$  (Paredes et al. 2019).

**Tabla 2**

*Tamaño de partículas*

<b>Tamaño (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>% de volumen por debajo</b>
<b>20</b>	8,27
<b>25</b>	12,47
<b>32</b>	19,44
<b>38</b>	25,85
<b>45</b>	33,20

*Nota.* Adaptado de “Characterization of commercial luminescent powders” (p. 2), por Paredes et al. 2019.

Los polvos de aluminato de estroncio dopados con europio y disprosio se caracterizan por tener generalmente las propiedades que se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3**

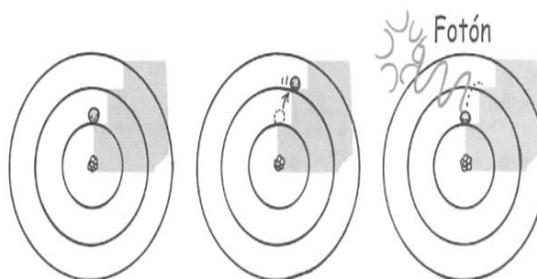
*Propiedades del aluminato de estroncio*

<b>Formula compuesta</b>	SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> : Eu <sup>+2</sup> , Dy <sup>+3</sup>
<b>Peso molecular (g/mol)</b>	209,11
<b>Punto de ebullición</b>	N/A
<b>Punto de fusión (°C)</b>	>1200
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	4,2
<b>Fluorescencia (λ)</b>	Verde

*Nota.* Adoptado de American elements 2020. (<https://bit.ly/3sQZq9N>).

## 2.4. Propiedades de la Lámpara

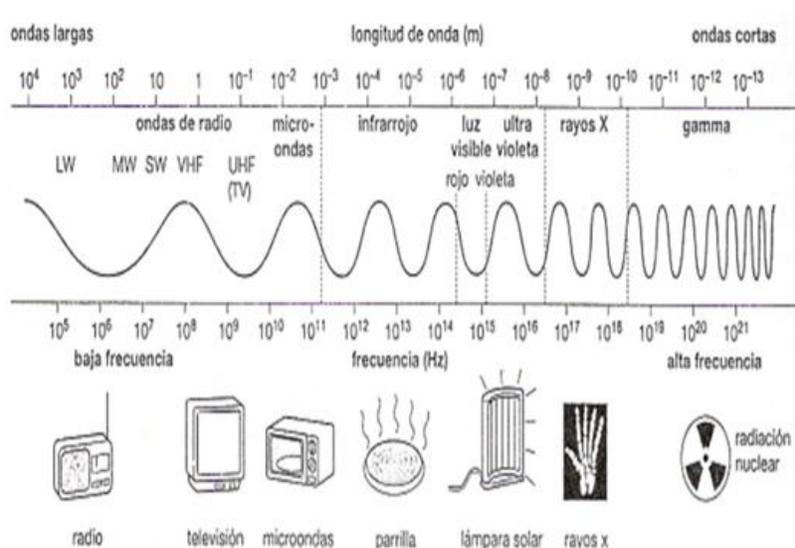
El fotón se denomina energía emitida de cierta manera, porque la colisión entre átomos produce suficiente energía para transferir al átomo, la energía es absorbida por el electrón, lo que hace que el electrón se desvíe de su nivel de energía inicial (estado estable) y se mantenga alejado del núcleo (estado excitado) generando un estado inestable que transcurrido un breve tiempo este electrón vuelve a su nivel original, la cual emite la energía absorbida durante la excitación. Los valores de energía necesarios para excitar a los electrones son valores estipulados para cada caso y la variación es a saltos discretos por lo tanto se dice que los valores están cuantizados o son cuánticos como se observa en la figura 5.



**Figura 5.** Proceso de excitación de un electrón

*Nota.* Adoptado de “Modelo atómico de emisión y de absorción de fotones” (p. 1), por S. Marini et al., 2015.

La agrupación de distintas energías de los fotones compone el espectro electromagnético que es una representación ordenada de la energía de las distintas radiaciones. En la figura 6 se muestran las distintas radiaciones en forma ordenada de energía creciente, que constituyen el espectro electromagnético, mostrando principalmente las longitudes de onda que hacen referencia a la lámpara solar de luz ultravioleta las cuales oscilan entre  $10^{-7}$  hasta  $10^{-8}$  y con frecuencias de onda de  $10^{15}$  Hz hasta  $10^{16}$  Hz.



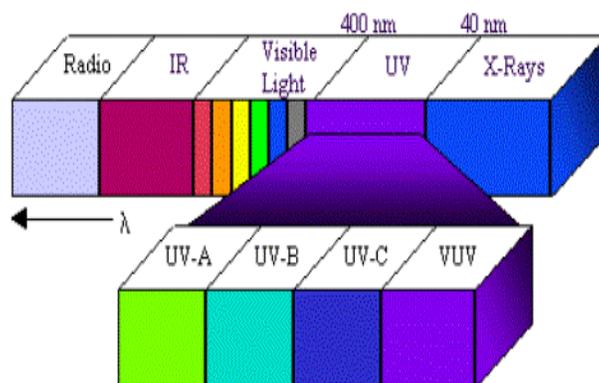
**Figura 6.** Radiaciones del espectro electromagnético

*Nota.* Adoptado de “Modelo atómico de emisión y de absorción de fotones” (p. 1), por S. Marini et al., 2015.

La luz ultravioleta (UV) es una forma de luz no visible para el ojo humano. Se sitúa entre los rayos X y la luz visible del espectro electromagnético; Una característica específica de la luz UV es que en sus longitudes de onda comprendidas entre los 200 y los 300 nanómetros (una milmillonésima parte de un metro), se pueden catalogar como germicidas, logrando la inactivación de microorganismos como, virus y protozoos. Esta facultad permite que la luz

ultravioleta se adopte ampliamente como una forma muy eficaz, sin productos químicos y así mismo respetuosa con el medio ambiente para desinfectar el agua y protegerla de microorganismos perjudiciales, ya que las bacterias y virus al exponerse a longitudes de onda germicidas se vuelve incapaces de infectar y reproducirse (Trojan UV water confidence, 2020). De todo el espectro, la luz UV con una longitud de onda de 254 nm es la más cercana de la mayor eficacia germicida a la vez que previene la formación de Ozono perjudicial para la salud (Infiltró Airguard, 2014).

La radiación UV puede ser emitida por luminarias fluorescentes mediante la ionización de gas de mercurio a baja presión. La capa fosforescente dentro del tubo absorbe la luz ultravioleta y la convierte en luz visible; parte de las longitudes de onda emitidas por el gas de mercurio están en el rango UV-C como se refleja en la figura 7 (EcuRed, 2020).

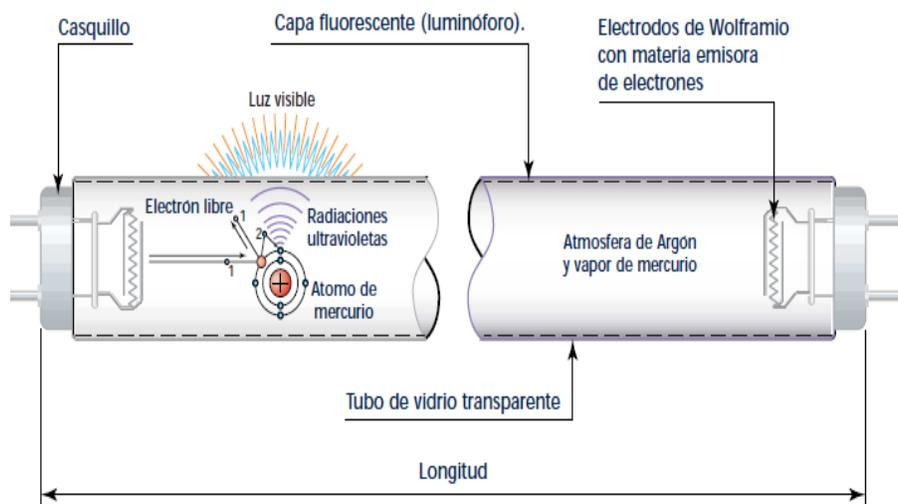


**Figura 7.** Tipos de luz UV

*Nota.* La UV-A y la UV-B activan los melanocitos en la piel para producir melanina “bronceado”, La radiación de la UV-B causa las quemaduras por el sol, la radiación de la UV-C es la absorbida por el ADN y es la causa más probable de cáncer. Adoptado de Infiltró Airguard, 2014. (<https://bit.ly/3uRK86j>).

La lámpara fluorescente mostrada en la figura 8 es fabricada en vidrio con forma tubular, con determinados diámetros y longitudes según la potencia. El tubo contiene gas argón a baja presión y poca cantidad de mercurio. Una vez conectada la lámpara en el circuito adecuado, la

corriente eléctrica calienta los electrodos y hace emitir electrones, los electrones obtenidos, durante su recorrido de un extremo a otro del tubo, colisionan con los átomos de mercurio y la energía desprendida en el choque cambia a radiación ultravioleta y por lo tanto invisibles, pero capaces de excitar la capa fluorescente que rodea el interior del tubo, con lo que se transforman en luz visible (Universidad Politecnica de Catalunya Barcelonatech, n.d.a).



**Figura 8.** Partes de una lámpara fluorescente

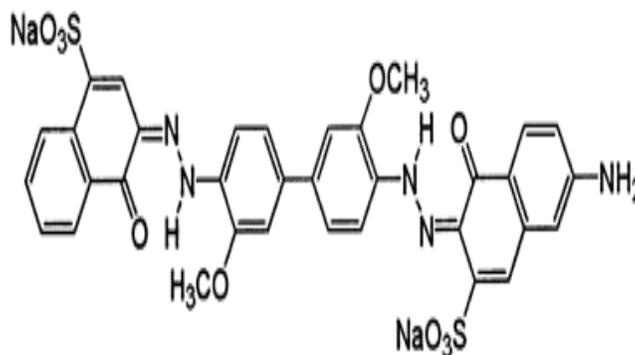
*Nota.* Adaptado de Manual de iluminación INDAL (<https://bit.ly/3q7ygtq>).

Las lámparas germicidas UV liberan una gran cantidad de Luz ultravioleta en 253.7nm, tienen una duración promedio de 3000 a 5000 Horas, siendo la más baja para 4W y la más alta para 15W en adelante los rayos UV no cambian las propiedades del agua ni del aire, es decir, no cambian químicamente la estructura del fluido a tratar (López et al. n.d.).

## 2.5. Propiedades del Colorante

El azul directo 151 es un polvo negro azulado, soluble en agua mostrando una solución azul violeta, pero fácilmente soluble en etanol, mostrando un color rojo púrpura (Cangzhou Xincheng Weiye Chemical, 2010). Sus características químicas se obtienen de (World dye variety, 2012) y se presentan a continuación.

- **Nombre:** CI Direct Blue 151, CI24175
- **Fórmula molecular:** C<sub>34</sub> H<sub>25</sub> N<sub>5</sub> Na<sub>2</sub> O<sub>10</sub> S<sub>2</sub>
- **Peso molecular:** 773,7 g/mol
- **pH directo:** 8±10
- **Estructura molecular:** doble clase azo



**Figura 9.** Estructura molecular del colorante

*Nota.* Adoptado de World dye variety [Direct blue 151], 2012. (<https://bit.ly/3qiEzu1>)

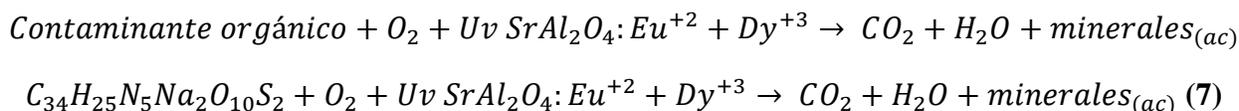
## 2.6.Reacciones Químicas.

De acuerdo a lo establecido en Vásquez ( 2010) la reacción para el tratamiento en este proyecto es una reacción catalítica heterogénea cuyos pasos consisten en tener una superficie catalítica en la cual se encuentra el PAE donde las especies que participan en la reacción deben llegar a la superficie y luego alejarse de ella a su vez el proceso se divide en difusión interna (se presenta la absorción por el catalizador del contaminante orgánico) y difusión externa (se da la desorción del contaminante orgánico cuando se presentan procesos de recombinación y una parte del contaminante es desplazado nuevamente por el catalizador).

### 2.6.1. Pasos de la Reacción Catalítica

1. Transporte de los reactantes del fluido a la interface fluido-sólido (superficie externa de la partícula catalizadora).
2. Transporte de los reactantes en el interior de la partícula (si esta es porosa)
3. Absorción de los reactantes en puntos superficiales de la partícula catalítica
4. Reacción química de los reactantes absorbidos creando productos absorbidos (reacción superficial)
5. Desorción de los productos absorbidos (debido a exceso de catalizador).

La descomposición de compuestos orgánicos puede presentarse como se presenta en la siguiente ecuación general siguiendo lo establecido en (Ballari, 2008).



Según Faraldos (2016c) la reacción del catalizador frente a la irradiación de luz UV es la siguiente.



### 2.7. Orden de la Reacción Fotocatalítica.

En 1918, Langmuir usó un modelo de superficie sólida simplificado para derivar isotermas de Tipo I: La superficie proporciona un cierto número de sitios de adsorción, y todos son equivalentes, cada sitio solo adsorbe una molécula, su adsorción es la ocupación de posiciones adyacentes independientes (las moléculas adsorbidas no interactúan entre sí) (Universidad de Valencia, 2010).

Dicho modelo teórico también es válido para la adsorción en monocapa en un número limitado de sitios de adsorción idénticos y específicos y una superficie completamente uniforme donde la interacción entre moléculas es insignificante (Figuroa et al. 2014)

El mecanismo espera que el más pequeño o el más lento de los cinco pasos involucrados en una reacción catalítica sea la reacción entre dos sustancias adsorbidas en una superficie catalítica uniforme. La adsorción puede realizarse en un solo tipo de sitio de superficie, o cada sustancia adsorbida puede adsorberse en su propio tipo de sitio de superficie, pero cada sustancia adsorbida está en equilibrio termodinámico con la fase correspondiente. La hipótesis de Langmuir-Hinshelwood asume que los reactivos interactúan y se transforman en sitios de adsorción activos para los productos (Curia, 2010). Esta isoterma es usada para determinar la constante cinética, a su vez la constante de equilibrio de adsorción del colorante azul directo 151 sobre la superficie del fotocatalizador; este modelo permite describir la cinética del proceso fotocatalítico aplicando la siguiente ecuación (Lucioni y Vega, 2012).

$$r = -\frac{dC}{dt} = -\frac{q * KC}{1 + KC} \quad (9)$$

Donde

q: Constante cinética de la relación para las condiciones experimentales

K: Constante de equilibrio de adsorción

C: Concentración del colorante

t: Tiempo de residencia

r: Velocidad de reacción

Cómo se menciona anteriormente para ajustar el proceso de degradación a un modelo cinético y obtener las constantes cinéticas de la velocidad de reacción, se utiliza el modelo de Langmuir-Hinshelwood, a partir del cual se puede utilizar una ecuación adecuada para colorantes de baja concentración, siendo las concentraciones de [60, 80, 100, 150 y 200] mg / L, lo suficientemente bajas para usar esta fórmula. Con base a lo anterior, la ecuación es la siguiente:

$$r = -\frac{dC}{dt} = -\frac{q * KC}{1 + KC} \approx qKC \approx q_{app}C$$

$$r = -\frac{dC}{dt} = q_{app}C$$

$$\text{Reordenando } r = -\frac{dC}{dt} = q_{app}dt$$

Integrando

$$-\int_{C_o}^C \frac{dC}{C} = q_{app} \int dt$$

$$-\ln \ln [C]_{C_o}^C = q_{app}t$$

$$-[\ln C - \ln C_o] = q_{app}t$$

$$\ln C_o - \ln C = q_{app}t$$

Aplicando reglas de logaritmos:

$$\ln \ln \left[ \frac{C_o}{C} \right] = q_{app}t \quad (10)$$

## 2.8.Ecuación para Cálculo de Banda de Energía Prohibida.

De acuerdo a Amaro (2006) en los inicios del siglo XX se comprobó que la radiación electromagnética transporta energía y puede ser absorbida o emitida. Para explicar el proceso de emisión y absorción, Plank y Einstein propusieron que la energía de la radiación se compone de unidades indivisibles (cuánticas). En cada proceso básico, solo se puede emitir o absorber un haz

de luz. Cada uno de estos cuantos se llama "fotón". Un fotón es una partícula denotada por la letra griega  $\gamma$  La energía del fotón es proporcional a la frecuencia de radiación.

$$E_{\gamma} = h\nu$$

Donde

h: Constante de Planck, cuyo valor es  $6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$

$\nu$ : Frecuencia de la radiación que viene dada por  $\frac{c}{\lambda}$  donde:

c: Constante de velocidad de la luz  $2,998 \times 10^8 m/s$

$\lambda$ : Longitud de onda en metros

Debido a que La energía de los fotones expresada en julios es demasiado pequeña. A escala microscópica, es conveniente utilizar electronvoltios como unidad de energía.

$$1ev = 1,602 \times 10^{-19} J$$

Entonces:

$$h: 4,1360799 \times 10^{-15} ev \cdot s$$

Finalmente, la ecuación a usar vendría dada de la siguiente forma:

$$E_{\gamma} = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow E_{\gamma} = \frac{(4,1360799 \times 10^{-15} J \cdot s)(2,998 \times 10^8 \frac{m}{s})}{\lambda} \quad (11)$$

## 2.9. Marco Conceptual

### 2.9.1. Agua.

Fase líquida de un compuesto químico formado aproximadamente por dos partes de hidrógeno y 16 partes de oxígeno, en peso. En la naturaleza contiene pequeñas cantidades de

agua pesada, gases y sólidos (principalmente sales), en disolución (IDEAM Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, n.d.).

### **2.9.2. Colorante.**

Un colorante es un compuesto orgánico que al aplicarlo a un sustrato (generalmente una fibra textil, pero también a cuero, papel, plástico o alimento) le confiere un color más o menos permanente. Un colorante se aplica en disolución o emulsión y el sustrato debe tener cierta afinidad para absorberlo. Los colorantes en general son solubles en el medio en el que se aplican o en el producto final. La producción mundial de colorantes es del orden de 90 millones de kg al año (Sanz, 2020b).

### **2.9.3. Contaminación**

Es la alteración del medio ambiente por sustancias o formas de energía puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y/o fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la nación o de los particulares (Ministro de Desarrollo Economico, 2002).

### **2.9.4. Agua Residual**

Agua que contiene materia disuelta y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria (MinDesarrollo, 2000).

### **2.9.5. Tratamiento de Agua Residual**

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos

presentes en el agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para la disposición o reúso. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables (EcuRed, n.d.).

#### **2.9.6. Fotocatálisis**

La fotocatalisis heterogénea ha aparecido como un método “verde” y ambientalmente amigable que atiende los problemas emergentes. Este proceso se caracteriza por un fotocatalizador particulado suspendido en una disolución o puesto en contacto con un sustrato en fase gaseosa y bajo irradiación con energía suficiente para producir foto-excitación (Nevárez et al. 2017).

#### **2.9.7. Aluminato de Estroncio**

Material fosforescente o material con prolongada persistencia de la luminiscencia usado en pinturas luminiscentes, tintas, señalización de seguridad pública, cerámicas, relojes, textiles y juguetes fosforescentes (Rojas, 2015c).

#### **2.9.8. Fotoluminiscencia**

Es el fenómeno que consiste en la emisión de luz como resultado de la absorción, de fotones. La energía absorbida durante dicho estímulo promueve las transiciones eléctricas a estados energéticos superiores, denominado estados excitados; cuando el electrón cae de un estado excitado a un estado energético inferior se produce la emisión de luz. La energía de excitación es aportada en forma de radiación electromagnética, generalmente esta energía es superior a la que se emite (Rojas, 2015d).

## 2.10. Marco Legal

En Colombia Existen normas encaminadas a la protección ambiental y la calidad del agua para consumo humano, como se muestra en la tabla 4, sin embargo, la normatividad referente al control de las descargas provenientes de industrias es muy limitada, ya que genera parámetros límites permisibles generalizando sin tener en cuenta la variación de las actividades que desarrolla cada subsector industrial las cuales podrían generar diferentes tipos de cargas contaminantes.

**Tabla 4**

*Normativa Colombiana*

<i>Ley/Decreto/Resolución</i>	<i>Entidad que la Emite</i>	<i>Descripción</i>
<b>Leyes</b>		
<b>Ley 23 de 1973</b>	Ministerio de ambiente	Por la cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al Medio ambiente y se dictan otras disposiciones.
<b>ley 99 del 22 de diciembre de 1993</b>	Ministerio de ambiente	Por el cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente y se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA.
<b>Decreto ley 2811 del 18 de diciembre de 1974</b>	Ministerio de ambiente	Se dicta el código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente.

---

**Decretos**


---

<i>Ley/Decreto/Resolución</i>	<i>Entidad que la Emite</i>	<i>Descripción</i>
<b>Decreto número 3100 de 30 de octubre del 2003</b>	Ministerio de ambiente	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como Receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.
<b>Decreto número 3440 del 21 de octubre del 2004</b>	Ministerio de ambiente	Por el cual se modifica el Decreto 3100 de 2003 y se adoptan otras disposiciones.
<b>Decreto número 4742 del 30 de diciembre del 2005</b>	Ministerio de ambiente	Por el cual se modifica el artículo 12 del Decreto 155 de 2004 mediante el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas"
<b>Decreto 1575 del 2007</b>	Ministerio de ambiente	En el que se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
<b>Decreto 3930 del 25 de octubre del 2010</b>	Ministerio de ambiente	El presente decreto establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

---

## Resoluciones

<i>Ley/Decreto/Resolución</i>	<i>Entidad que la Emite</i>	<i>Descripción</i>
<b>Resolución 0631 del 2015</b>	Ministerio de ambiente	En la que se establece para el sector: Actividades de fabricación y manufactura de bienes en el artículo 13 los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas-
<b>Resolución 0631 del 2015</b>	Ministerio de ambiente	Residuales no Domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes. En el cual se establece el parámetro de color real medido a tres longitudes de onda (436, 525,620) nm. A su vez en el artículo 18 se estipula que los responsables de la actividad deben determinar los parámetros solicitados con análisis y reporte de las longitudes de onda mencionadas anteriormente.
<b>Convenio Interadministrativo UN-MADS No. 338/2015</b>	El Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y la Universidad Nacional de Colombia (UN)	Por medio de la cual se establecen Programas integrales de gestión ambiental para subsectores productivos prioritarios con la ayuda de actores involucrados.

*Nota.* Elaborada por Autores con base a información del Ministerio de Ambiente y desarrollo territorial.

### **3. Diseño Metodológico**

#### **3.1. Tipo de Investigación**

La realización del presente proyecto se basó en el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos de las pruebas de espectrofotometría (absorbancia) hechas a las muestras preparadas y tratadas previamente en laboratorio, teniendo en cuenta la longitud de onda en la cual se observó el pico máximo de absorbancia; por otra parte, también se analizó cualitativamente cada muestra, una vez terminado su periodo de tratamiento en el cual se reflejaba visualmente la remoción del colorante.

#### **3.2. Metodología**

Para el desarrollo de esta investigación se tienen en cuenta diferentes artículos científicos obtenidos de plataformas de investigación como Scienes Direct, Scopus, Elsevier y Google académico; Considerando la información consultada, se establecen las etapas como se observa en la figura 10, las cuales son descritas seguidamente para permitir el entendimiento y la continuidad de avances científicos referentes al presente trabajo; a su vez se emplea el diseño experimental descrito en la etapa II para el desarrollo de los laboratorio.

### 3.3. Estructura del Diseño Metodológico

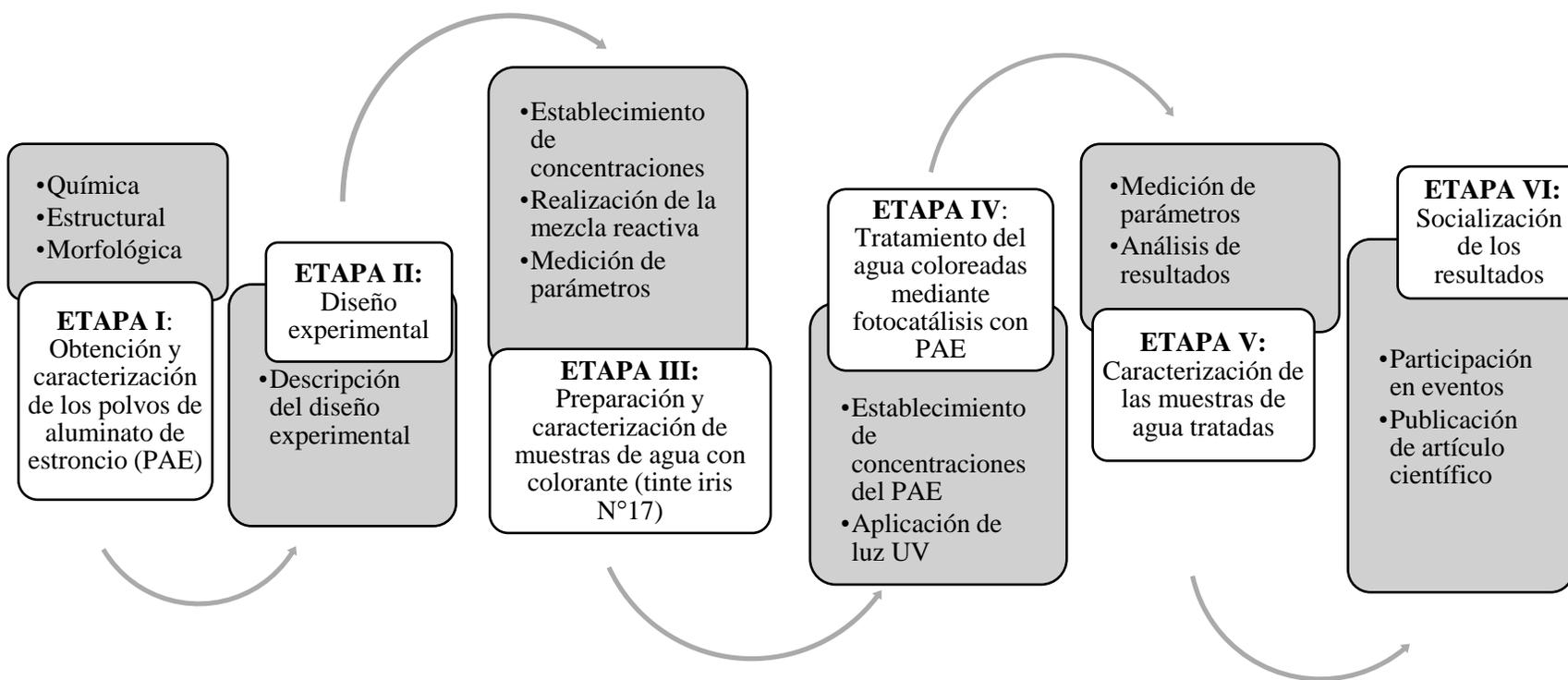


Figura 10. Metodología

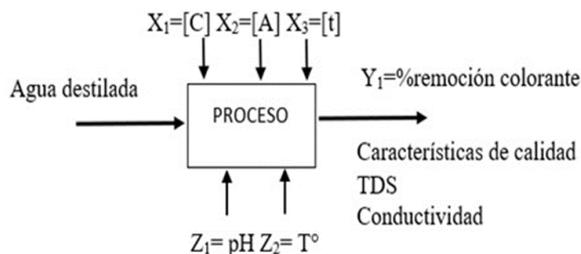
### ***Etapa I.***

Obtención y caracterización de los polvos de aluminato de estroncio (PAE). Estos polvos fueron suministrados por la empresa Novacolor SAS, y en colaboración de la universidad pedagógica y tecnológica de Colombia (UPTC) se obtuvo la información sobre la caracterización química, estructural y morfológica, quienes realizaron este análisis mediante la aplicación de técnicas como la Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar su composición química usando el equipo PANalytical MiniPal- W4025; además aplicaron métodos como microanálisis por Espectroscopia de Energías Dispersas (EDS-SEM) este sistema es básicamente un detector de rayos X, que golpea un haz de electrones de alta energía ( $> 10$  keV), este detector captura los rayos X generados en la muestra de observación (Aguirre, 2019a) mediante el microscopio electrónico de barrido y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) siendo esta una de las técnicas más versátiles a la hora de estudiar y analizar las características morfológicas y microestructurales de objetos sólidos. (Aguirre, 2019b), utilizando el equipo Carl Zeiss fabricado en Alemania con número de referencia EVOMA 10, el cual emplea tres tipos de rayos como los dispersos, retrodispersos y los secundarios (López, 2018), por medio de esta caracterización se podrán conocer las propiedades fotosintéticas que poseen los PAE.

### ***Etapa II.***

Diseño experimental; para este diseño se tuvo en cuenta la teoría del libro (Gutiérrez y De la Vara Salazar, 2008) a partir del cual se desarrolla la etapa número uno que corresponde a la planeación y realización del diseño con sus respectivas fases necesarias para la realización del experimento que se muestran a continuación.

## Fase I. Esquema del Diseño



**Figura 11.** *Esquema experimental*

Las características de calidad definidas al inicio del proyecto fueron DQO, DBO, TDS; pero como se observa en la figura 11 en su desarrollo, solo se tuvieron en cuenta como características de calidad sólidos disueltos totales y Conductividad, ya que estos dos parámetros se adaptaron mejor para el desarrollo del proyecto debido a que pueden ser medidos y analizados de forma in-situ.

## Fase II. Factores de Investigación

**Tabla 5**

*Definición de tipo de factores*

<b>Factor</b>	<b>Tipo de factor</b>	<b>Modo de observación</b>
[ ] colorante	Controlable	
[ ] aluminato	Controlable	Se verifica mediante análisis cualitativo y de absorbancia
T (diferentes tiempos)	Controlable	
PH	No Controlable	

<b>T°</b>	No Controlable	Se verifica mediante el multiparámetro
-----------	----------------	---

**Fase III. Niveles de Prueba.** Se definieron los siguientes niveles de prueba para cada factor

- [ ] de aluminato =>2
- [ ] de colorante =>5
- De tiempo =>5

**Fase IV. Variable de Respuesta.** Se definió como variable de verificación o respuesta el % de remoción del color del agua el cual se determinará midiendo absorbancia con el espectrofotómetro.

**Fase V. Tipo de Diseño.** De acuerdo a las necesidades del experimento a realizar se seleccionó como mejor opción de diseño el diseño factorial mixto, ya que este nos permite integrar los factores con diferentes niveles.

**Fase VI. Matriz de Experimentos.**

**Tabla 6**

*Matriz experimental*

Experimento	Variables		
	[ ] Colorante ppm	[ ] Aluminato ppm	Tiempo en cantidad de horas
<b>1</b>			<b>1</b>
<b>2</b>	<b>60</b>	<b>500</b>	<b>2</b>
<b>3</b>			<b>3</b>

Experimento	Variables		Tiempo en cantidad de horas
	[ ] Colorante ppm	[ ] Aluminato ppm	
4		500	4
5	60		5
6			1
7			2
8	60	1000	3
9			4
10			5
11			1
12			2
13	80	500	3
14			4
15			5
16			1
17			2
18	80	1000	3
19			4
20			5
21			1
22			2
23	100	500	3
24			4
25			5
26			1
27			2
28	100	1000	3
29			4
30			5

Experimento	Variables		Tiempo en cantidad de horas
	[ ] Colorante ppm	[ ] Aluminato ppm	
31			1
32			2
33	150	500	3
34			4
35			5
36			1
37			2
38	150	1000	3
39			4
40			5
41			1
42			2
43		500	3
44			4
45			5
46	200		1
47		1000	2
48			3
49			4
50			5

### *Etapa III.*

Preparación y caracterización de muestras de agua con colorante (el tinte usado en el presente proyecto tiene como nombre comercial, iris azul oscuro N°17 y es fabricado por la empresa Tinte iris y obtenido a partir del azul directo 151); en esta etapa siguiendo lo reportado por (Manrique et al., 2017c) y lo estipulado en la tabla 6 se homogeniza cada mezcla reactiva por

10 minutos a 500 revoluciones y se establecen las concentraciones de colorante a trabajar para un volumen de agua destilada de 400 ml como se presenta en la tabla 7, se miden los parámetros potencial de hidrógeno (pH), sólidos disueltos totales (TDS), conductividad eléctrica (EC) usando el equipo multiparámetro HandyLab 680, al agua destilada previa disolución del tinte, ya que estos parámetros serán los de mayor importancia a observar durante el experimento.

**Tabla 7**

*Concentraciones de colorante*

<b>Muestra</b>	<b>Concentración ppm</b>	<b>Cantidad de colorante(g)</b>
<b>1</b>	60	0,024
<b>2</b>	80	0,032
<b>3</b>	100	0,04
<b>4</b>	150	0,06
<b>5</b>	200	0,08

***Etapa IV.***

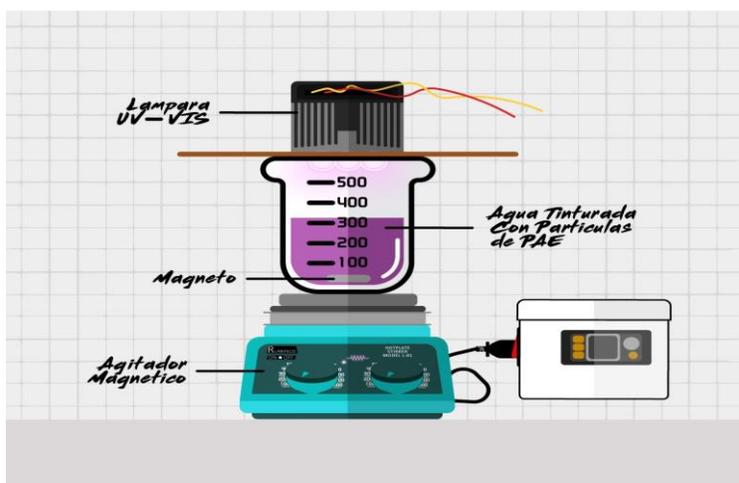
Tratamiento del agua coloreada mediante fotocatalisis con PAE. En esta etapa, se realizará el tratamiento de las aguas con iris mezcladas en la etapa anterior. Se trabajará con las concentraciones de PAE que se describen en la tabla 8 y aplicación de luz UV usando una lámpara miniatura, de nomenclatura T8 con diámetro de 26 mm, con Gama de potencia de 15 W, y vida estimada de unas 5000 horas y una longitud de onda 255 nm (Universidad Politécnica de Catalunya Barcelonatech, n.d.b) con la cual se realiza el cálculo del band gap usando la ecuación 11, dicho proceso se realizará para tiempos de 1, 2, 3, 4 y 5 horas se miden los parámetros: potencial de hidrógeno (PH), sólidos disueltos totales (TDS), conductividad eléctrica (EC)

usando el equipo multiparámetro HandyLab 680 a cada muestra de agua. En la figura 12 se presenta el prototipo a escala laboratorio, para el tratamiento de las muestras de agua.

**Tabla 8**

*Concentraciones de los polvos de aluminato de estroncio*

Muestra	Cantidad de fotocatalizador PAE (g)	Concentración (ppm)
1	0,2	500
2	0,4	1000



**Figura 12.** Prototipo para el tratamiento del agua

*Nota.* Autores en colaboración con Mario A Ascanio P (Diseñador gráfico)

### **Etapa V.**

Caracterización de las muestras de agua tratadas. Una vez se obtengan las muestras tratadas en la etapa anterior para cada concentración de PAE y tiempo, se procederá a determinar la cantidad de color mediante la absorbancia por UV-Vis usando el espectrofotómetro

GENESYS 10S UV-Vis en el laboratorio de Calidad Ambiental a cada muestra; para establecer la eficiencia de remoción del colorante y realizar el análisis e interpretación de los resultados que serán reportados en tablas y gráficas, comparando cada parámetro con lo establecido en la resolución 0631 de 2015 y definiendo los valores óptimos de las variables.

### ***Etapa VI.***

Socialización de los resultados. Mediante la participación en eventos, publicación de artículo científico, escritura de informe final donde se reporte la eficiencia y efecto de la fotocatalisis con PAE en la remoción de colorante iris N°17, en función del tiempo y de la concentración del PAE.

### **3.4. Formulas Aplicadas**

Durante el desarrollo del proyecto se usaron las siguientes ecuaciones:

#### ***3.4.1. Cálculo de Dilución del Iris***

ppm=>[mg/L]

[Colorante (mg/l)]\*Agua (L)=Colorante (mg)

$$\frac{\text{Colorante (mg)}}{1000} = \text{Colorante (g)} \quad (12)$$

#### ***3.4.2. Cálculo de Cantidad de PAE***

Ppm=> [mg/L]

[mg/L]=> [g/L]

[g/L]\*0,4L=g de PAE (13)

### 3.4.3. Ecuaciones para el Cálculo de Efectividad de Remoción

La efectividad de remoción tiene en cuenta la carga contaminante al inicio o entrada de un proceso y la carga al final de este una vez realizado cierto tratamiento y está definida a partir de la siguiente ecuación (Gutiérrez et al., 2014).

$$\% \text{ de remoción} = \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} * 100 \quad (14)$$

Donde

$A_0$ : Absorbancia inicial del colorante

$A_t$ : Absorbancia en diferentes intervalos de tiempo

### 3.4.4. Ecuación de Calibración

Para la investigación de sustancias químicas, es necesario utilizar técnicas analíticas para comprender sus características cualitativas y cuantitativas, así como su comportamiento físico-químico y biológico (para moléculas biológicas). Esta ecuación se basa en un modelo que incluye hallar la línea de calibración más adecuada para ajustar la linealidad de los puntos experimentales "x", donde cada punto está dado por una variable independiente (concentración) y una variable dependiente (nivel de absorbancia) (Fajardo et al., 2018). La línea de calibración se define mediante la siguiente ecuación:

$$Y = A + B * X \Rightarrow Abs = B[C] - A \quad (15)$$

Para este modelo

Y: Nivel de absorbancia

A: Parámetro de ajuste de la curva

B: Pendiente de la curva de calibración

X: Concentración de la solución

Teniendo en cuenta la ecuación de la curva de calibración ecuación 14 y los resultados de la Curva de calibración para el azul directo 151 de 60 a 300 ppm a longitud de onda  $\lambda_{\max}$ : 561 nm que se muestran en tabla 12 se define la siguiente ecuación

$$Abs = -0,03057 + 0,00239 * [Colorante] \quad (16)$$

### 3.4.5. Ecuación de Concentración Real en el Tiempo.

Esta ecuación es obtenida a partir del despeje de la variable concentración en la ecuación (15) de calibración para el cálculo de la concentración real de cada muestra una vez tratada.

$$[C] = \frac{Abs + 0,03057}{0,00239} \quad (17)$$

### 3.4.6. Rapidez de Degradación (C/Co Vs tiempo).

Para determinar el gráfico de tasa de cambio de color, es necesario conocer la concentración de la muestra (real “C”) en relación con la concentración inicial (pesada en laboratorio sin tratamiento “Co”). Según la ley de Lambert Beer, la concentración es proporcional a la absorbancia, pero es importante considerar que esta ecuación solo se aplica a soluciones diluidas, como las preparadas en este proyecto a continuación se presenta la ecuación de la ley de Lambert beer (Torres, 2013b).

$$Abs = ab[C] \quad (18)$$

a: Constante del sistema (adsorvitividad)

b: Longitud de paso óptico

[C]: Concentración del colorante

Para un sistema dado a y b son constantes

$$Abs = K * C \Rightarrow K = a * b \Rightarrow a * b = m(\text{pendiente})$$

$$Abs = m * C \quad (19)$$

### 3.4.7. Ecuación orden de Reacción Fotocatalítica

Para determinar el orden de reacción fotocatalítica se utiliza la ecuación 20, con la cual se traza una curva que representa  $\ln [C_0/C]$  (logaritmo natural del coeficiente de la concentración inicial del azul directo 151 y concentración real del mismo) Vs tiempo (expresada en horas); aunque para verificar si la curva corresponde a la reacción de segundo orden, se debe dibujar  $1/C$  ( $1/\text{Concentración real de azul directo 151}$ ) Vs tiempo (expresada en horas) (Torres, 2013c).

$$\ln \ln \left[ \frac{C_0}{C} \right] = q_{app} t \quad (20)$$

## 4. Presentación de Resultados

### 4.1. Objetivo 1

**Identificar las propiedades químicas, morfológicas y estructurales de los polvos a base de aluminato de estroncio mediante una revisión de fuentes primarias y secundarias, como base científica para la verificación de la incidencia de las características del polvo con la remoción.**

Los aluminatos de estroncio a usar en el presente proyecto son fabricados por la empresa Novacolor SAS quien uso el método hidrotermal para su síntesis este método según lo reportado en (Bazan et al., 2012b) consiste en usar temperaturas y presiones superiores a las condiciones ambientales con el fin de formar una estructura tridimensional o monoclinica con enlaces covalentes y su caracterización, química, estructural y morfológica se obtuvo mediante la Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia (UPTC), por medio de tres técnicas de caracterización siendo el primero el análisis químico para este utilizaron la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) mediante el cual se pueden apreciar con seguridad y exactitud la composición química por elementos presentes en los PAE; la técnica de microanálisis por Espectroscopia de Energías Dispersas (EDS-SEM) en este método realizaron el análisis de una partícula de los PAE, luego a esta le realizaron un estudio al detalle y por ultimo un análisis fuera de la zona para verificar que elemento prevalece en ella y la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) usada para observar la morfología de las partículas con un aumento de 2000 X y 5000 X.

#### 4.1.1. Caracterización Química, Estructural y Morfológica Reportado por la UPTC

Los análisis para la determinación de las propiedades químicas, estructurales y morfológicas de los PAE se realizaron mediante la aplicación de los siguientes métodos:

**Fluorescencia de Rayos X (FRX).** Las propiedades químicas de un fotocatalizador se pueden establecer mediante la aplicación de FRX para así obtener la composición química del semiconductor la cual se fundamenta en términos de elementos y óxidos, al conocer estas características se podrán determinar los usos en diferentes aplicaciones industriales. A través de este mecanismo, usando el equipo PANalytical MiniPal- W4025 se especifica la composición química del aluminato de estroncio por óxidos, la cual es más exacta que por elemento, y como resultado se obtuvo que los PAE están compuestos por óxidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  y  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  la presencia de estos mejora la remoción del contaminante ya que por medio del proceso fotocatalítico se reducen permitiendo la degradación de la materia orgánica como se presenta en la tabla 9.

**Tabla 9**

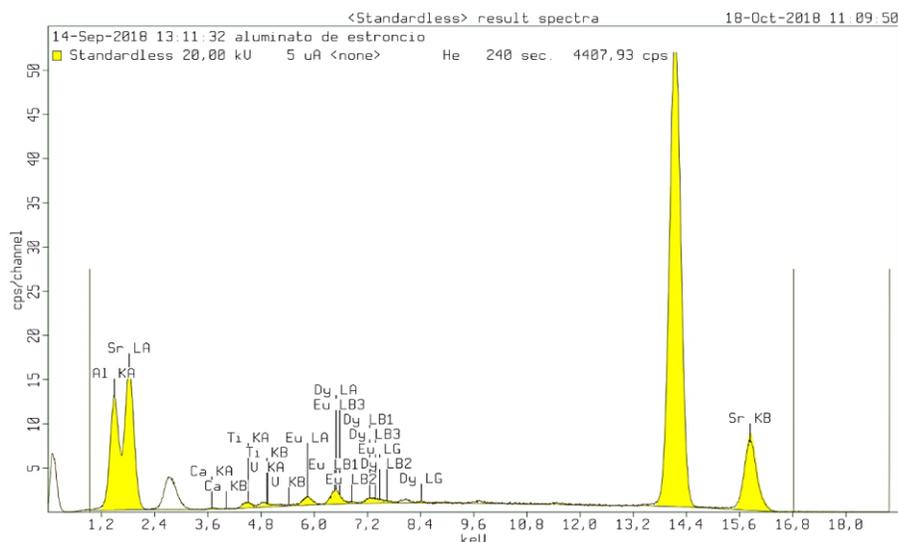
*Óxidos en aluminato de estroncio*

Compuesto	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{V}_2\text{O}_5$	$\text{SrO}$	$\text{Eu}_2\text{O}_3$	$\text{Dy}_2\text{O}_3$
Concentración	37,3	0,064	0,21	0,10	61,7	0,34	0,28
Unidad	%	%	%	%	%	%	%

*Nota.* Elaborado por UPTC

De acuerdo a lo anterior las composiciones más altas de óxidos presentes en el aluminato de estroncio corresponden al óxido de estroncio y aluminio con un porcentaje de concentración del 61,7 y 37,3 respectivamente, con lo cual se demuestra que el compuesto predominante en los PAE es el óxido de estroncio. Además de aluminio y estroncio, los polvos de aluminato de estroncio, contienen diferentes compuestos, entre los cuales el de mayor concentración es el

óxido de europio, seguido del óxido de disprosio, estos dos son usados como dopantes y son los de importancia para nuestro proyecto, ya que confieren la capacidad fotoluminiscente a los polvos. En la figura 13 se observa el espectro generado en la espectroscopia de fluorescencia de rayos X



**Figura 13. Espectro de fluorescencia**

De la anterior figura se observa que el estroncio y el aluminio muestran picos muy similares, de intensidad, lo que permite suponer que la lectura dada del aluminato de estroncio en realidad pertenece, por lo menos en su mayoría, a óxido de estroncio y aluminio, corroborando la composición química de los PAE.

**Microanálisis Mediante Espectroscopia de Dispersión de Energías (EDS).** Para determinar las propiedades estructurales y morfológicas realizaron el análisis de las partículas del polvo de aluminato de estroncio usando espectroscopia de energías dispersas (EDS) mediante el microscopio electrónico de barrido de lo cual se obtienen los porcentajes en peso y atómico de cada elemento presente en una de las zonas de la partícula estudiada.

En la (fila 1) de la tabla 10 se presenta la micrografía, el espectro del  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{+2}$ ,  $\text{Dy}^{+3}$  en el que se denotan los elementos que componen la partícula ( $\text{O}_2$ , Al, Sr, Dy); y se

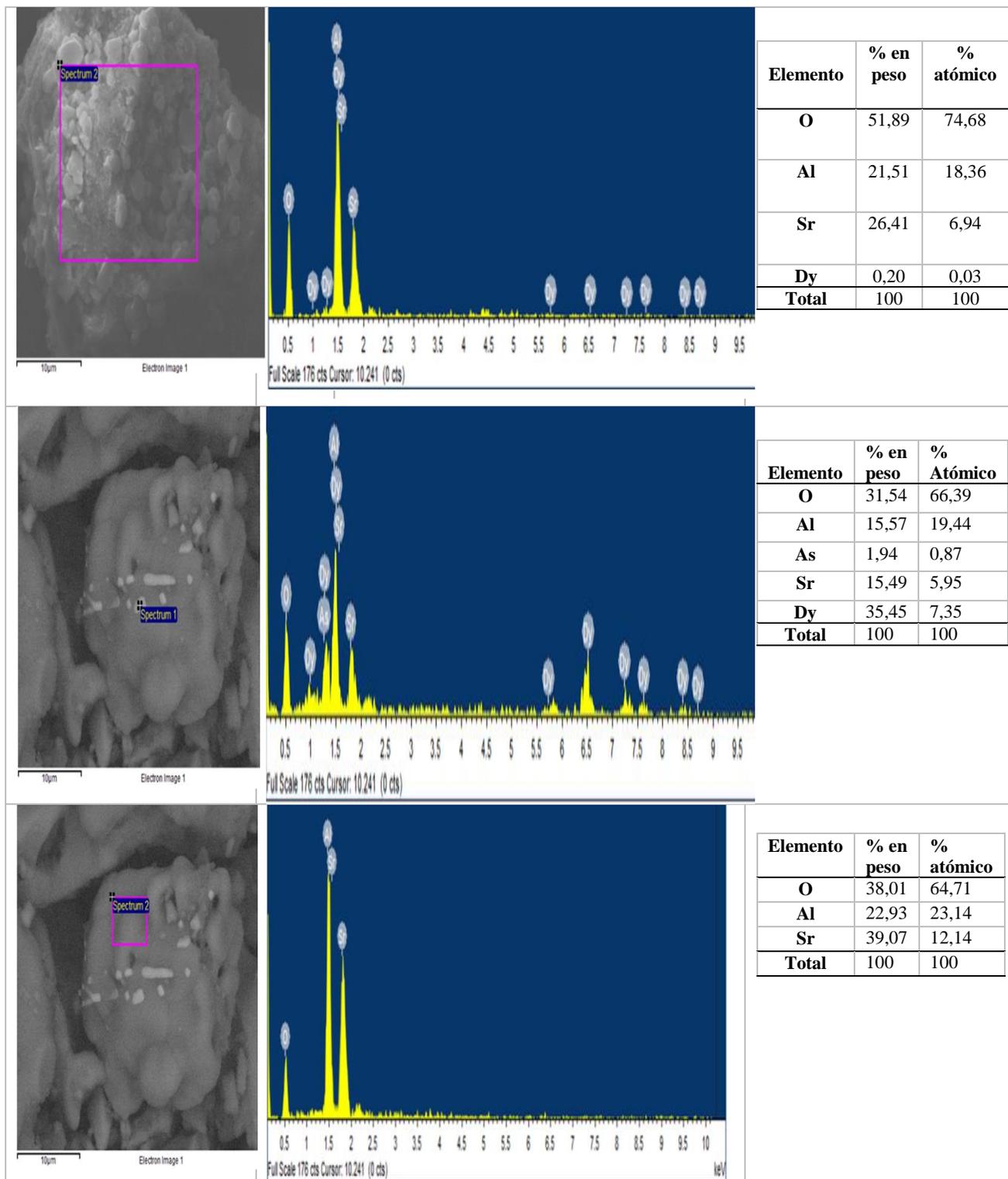
enmarca la zona de la partícula de PAE analizada, así como la composición química por elemento de la muestra, la cual se determina por corrección ZAF a los datos del espectro. En esta zona se verifica la presencia de disprosio en porcentajes en peso y atómicos bajos y se observa que el elemento predominante en esta zona de la partícula es el oxígeno.

En la fila 2 se puede distinguir que la partícula está compuesta por otras más pequeñas, por lo que se realizó un análisis específico (al detalle) de una de las partículas. Los resultados de la composición química permiten inferir que esta partícula contiene la mayor cantidad de disprosio (DY), lo cual se evidencia el aumento cuantitativamente al pasar de un porcentaje en peso de 0,2 a 35,45% (partícula al detalle).

Con el fin de reafirmar el punto de vista anterior, realizan el análisis EDS fuera del área, los resultados fuera de la zona de la partícula se muestran en la fila 3, del análisis realizado sobre la partícula estudiada anteriormente se observa que desaparece el disprosio a partir de lo cual se puede afirmar que el dopante (Dy) se encuentra distribuido en diferentes zonas de las partículas que componen el aluminato de estroncio, la presencia de este dopante mejora la capacidad fotoluminiscente del PAE contribuyendo en la efectividad de remoción.

**Tabla 10**

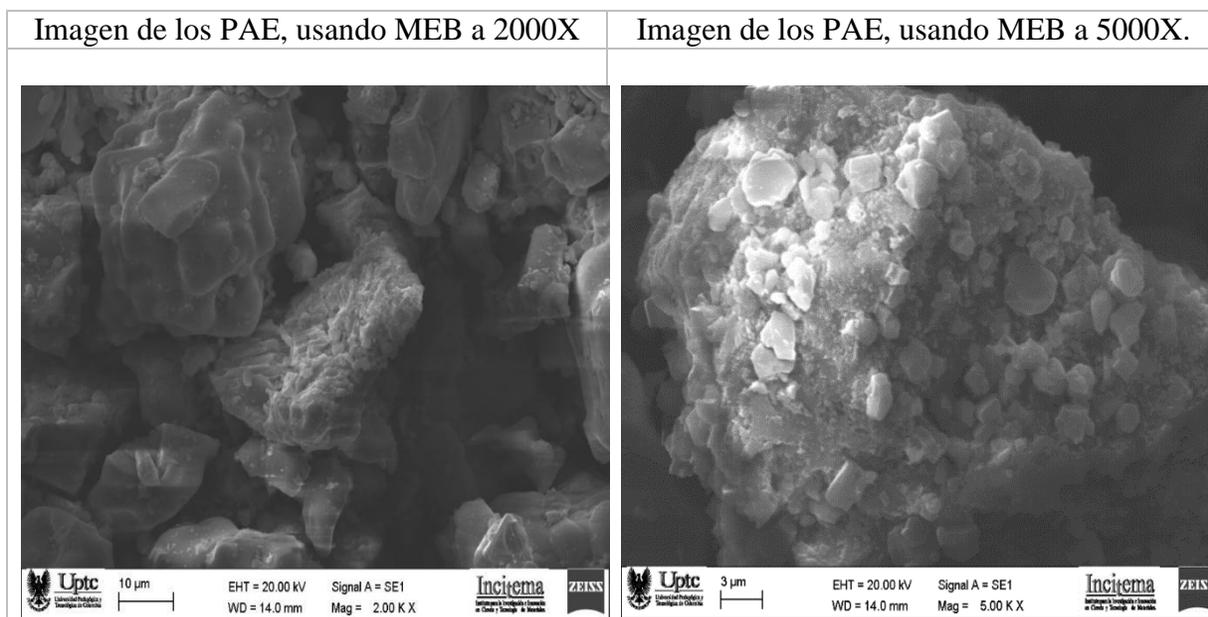
*Micrografía, espectro y resultados cuantitativos de la partícula*



**Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).** Realizaron el análisis morfológico del PAE, donde se presenta una imagen de una muestra de polvo de aluminato de estroncio, que fue tomada por un detector de electrones secundarios (SE) a través de un microscopio electrónico de barrido con un aumento de 2000 X (2K X) y 5000 X (5K X), se puede observar en la tabla 11 que la morfología de las partículas tiene tamaños irregulares y que además posee diferentes formas; siendo esta característica típica de la síntesis por conformado en estado sólido del PAE, en el análisis de tamaño de partículas de la imagen se utilizó el software image J para determinar el valor promedio de partícula que se encuentra en  $15,48 \pm 10,4$ .

**Tabla 11**

*PAE con MEB a 2000X y 5000X*



En la imagen a 5000X se confirma la morfología irregular de pequeñas partículas apiladas que componen partículas más grandes, lo cual es típico de la síntesis por estado sólido que fue utilizada para los PAE. Adicionalmente como característica física se comprobó que la banda de energía prohibida del catalizador fuese inferior a la energía de los fotones de luz

emitidos por la lámpara, mediante la ecuación 11 se realizaron los cálculos de banda de energía prohibida de los PAE teniendo en cuenta que su longitud de onda es 507 nm y el cálculo de energía de los fotones de la lámpara cuya longitud de onda es 255 nm, los resultados fueron respectivamente 2,445ev y 4,462ev, lo que permite la excitación adecuada de los electrones.

#### **4.2. Objetivo 2**

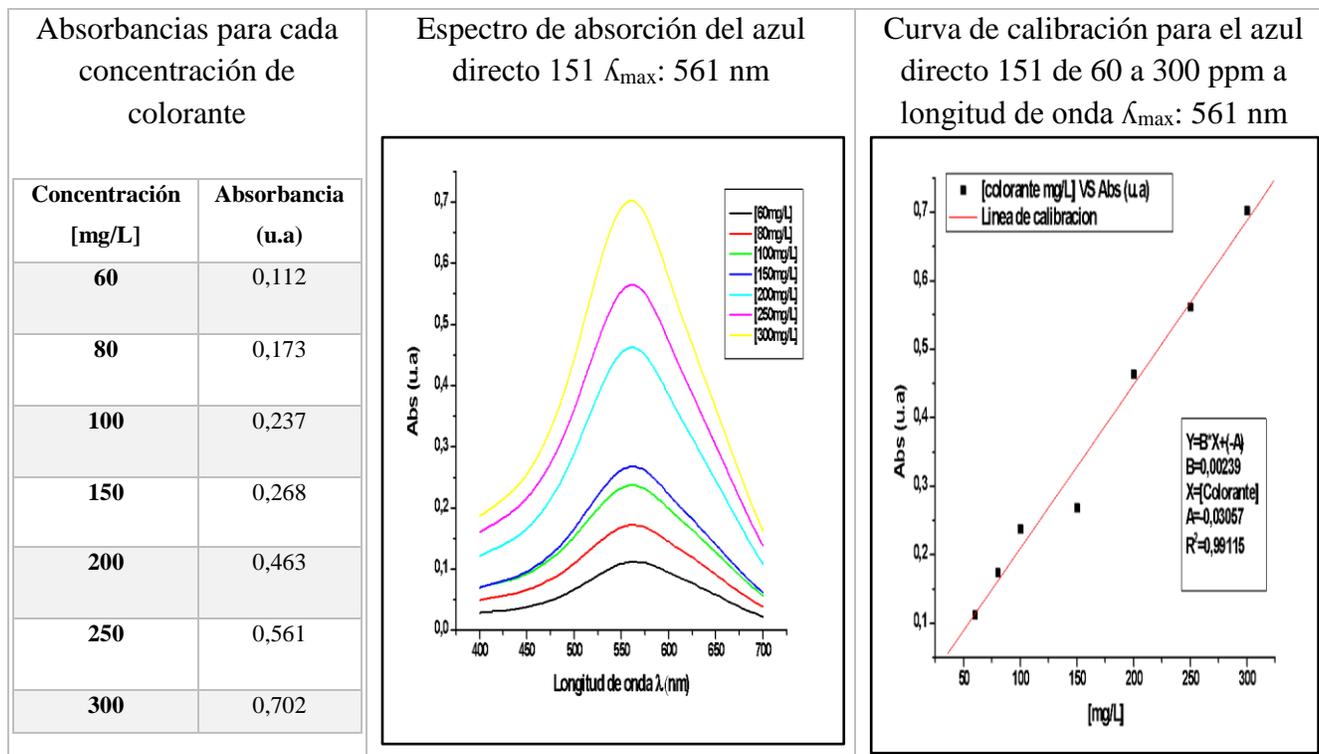
**Desarrollar pruebas experimentales aplicando fotocátalisis UV con polvos de aluminato de estroncio a nivel de laboratorio teniendo en cuenta los parámetros establecidos para la obtención de las relaciones entre el tiempo y concentraciones del polvo y del colorante.**

Para el cumplimiento de este objetivo se desarrollaron previamente los cálculos necesarios para realizar las diluciones y preparación de las muestras en laboratorio usando las concentraciones de colorante definidas 60, 80, 100, 150, 200 (ppm) para un volumen de agua de 400 ml aplicando la ecuación 12 y a su vez se realizan los cálculos usando las concentraciones de polvos definidas 500 y 1000 ppm para hallar las cantidades necesarias de PAE en gramos para la remoción usando la ecuación 13.

Posteriormente para determinar la concentración real de colorante iris azul directo 151 se definieron primero las absorbancias versus concentración de muestras de [60, 80, 100, 150, 200, 250 y 300] mg/L; también se tuvo en cuenta para todas las concentraciones, la longitud de onda en la que se presentaba el pico de absorbancia siendo esta la de 561 nm los datos obtenidos se observan en la tabla 12, a partir de estos datos se realizaron las gráficas presentadas a continuación.

**Tabla 12**

*Espectro de absorción y curva de calibración azul directo 151*



Se observa que hay un muy buen ajuste de datos ya que la  $R^2$  es aproximadamente 1.

Adicionalmente se realizaron los ajustes de la reacción para determinar su orden ( $1^\circ$  y  $2^\circ$ ); para el cálculo del orden de reacción se realizó un experimento adicional con la menor concentración trabajada en los primeros laboratorios [60 mg/L], ya que esta concentración desde la primera hora logró una eficiencia de remoción del 100%, los datos obtenidos se reflejan en la tabla 13.

**Tabla 13**

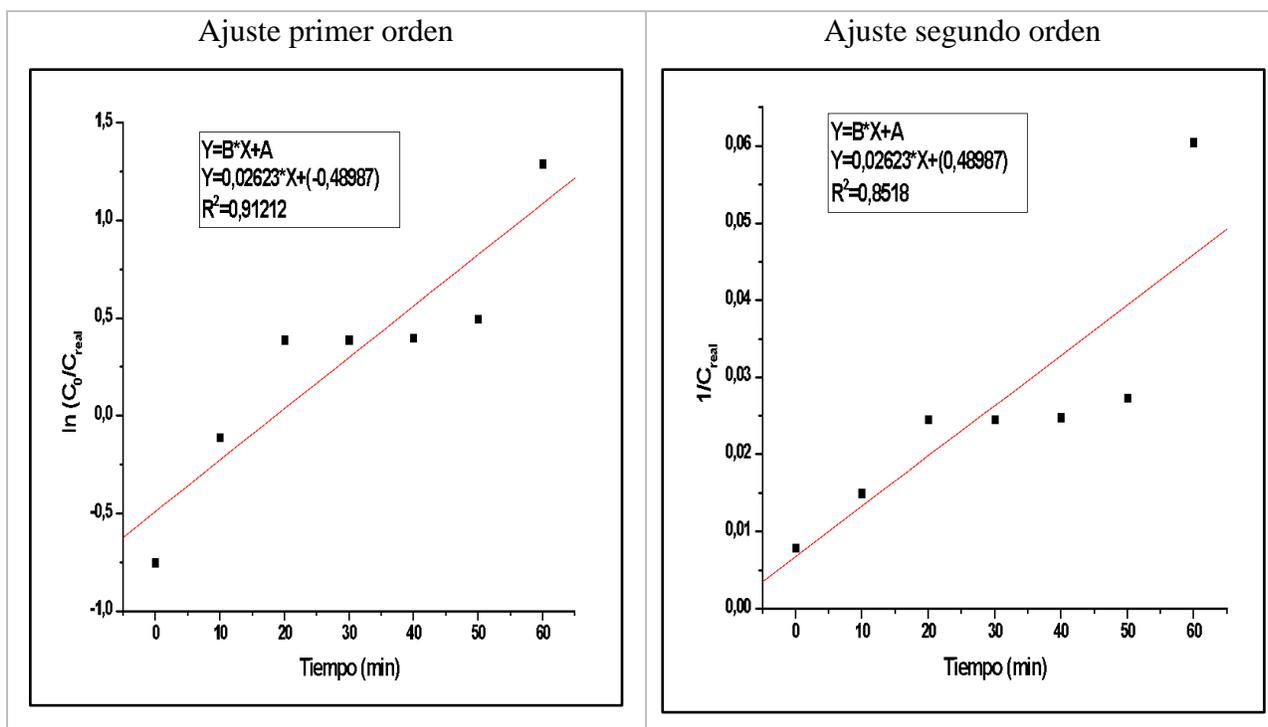
*Ajuste de reacción con [60 mg/L] de colorante*

<b>Concentración pesada de colorante [60mg/L]</b>						
<b>Tiempo (minutos)</b>	<b><math>\lambda_{\max}</math></b>	<b>Abs (<math>\mu.a</math>)</b>	<b>Eficiencia %</b>	<b><math>C_{\text{real}}</math></b>	<b>1er orden <math>\ln(C_0/C_{\text{real}})</math></b>	<b>2do orden (<math>1/C_{\text{real}}</math>)</b>
0	561	0,274	0%	127,435	-0,753	0,007
10	561	0,13	53%	67,184	-0,113	0,014
<b>60</b>	561	0,067	76%	40,824	0,385	0,024
30	561	0,067	76%	40,824	0,385	0,024
40	561	0,066	76%	40,405	0,395	0,024
50	561	0,057	79%	36,640	0,493	0,027
60	561	0,009	97%	16,556	1,287	0,060

La concentración real calculada dio más alta de la concentración estipulada y pesada dando una concentración real de [128] lo cual daría una cantidad de 0,051g esta cantidad de colorante se acercan a la concentración de [150] realizada anteriormente en los laboratorios por lo tanto la eficiencia de remoción de esta prueba se compara con la de la concentración de [150] a la primera hora. Al comparar la concentración de [150mg/L] con la de [128mg/L] a una hora de tratamiento se observa que la eficiencia sigue siendo 96% lo que demuestra nuevamente la efectividad del proceso y permite asumir que se puede disminuir los tiempos de remoción. A continuación, se presentan las gráficas en la tabla 14 correspondientes al primer y segundo orden de reacción respectivamente de acuerdo a los datos tabulados anteriormente.

Tabla 14

Ajustes de primer y segundo orden



Al observar las anteriores graficas se pudo determinar que la reacción de primer orden es más cercana a una recta en comparación con la de segundo orden, teniendo en cuenta el coeficiente de correlación lineal si la reacción se aproxima a la unidad se podría considerar que la ecuación tiene un buen ajuste de datos; para el caso el coeficiente  $R^2 = 0,91212$  lo cual indica que el ajuste es bueno.

Así mismo durante el tratamiento de las muestras preparadas se tomaron los datos de los parámetros criterios establecidos los cuales son objeto de análisis y se presentan a continuación.

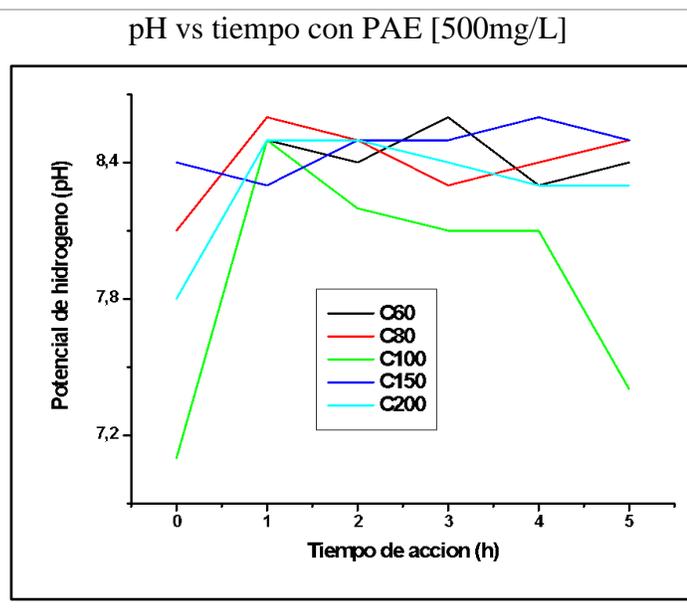
#### 4.2.1. Potencial de Hidrogeno (pH)

- Resultados de pH para PAE [500mg/L] y todas las Concentraciones de Colorante.

Tabla 15

*pH desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [500]*

Tiempo (h)	Concentración colorante(mg/L)				
	60	80	100	150	200
0	7,8	8,1	7,1	8,4	7,8
1	8,5	8,6	8,5	8,3	8,5
2	8,4	8,5	8,2	8,5	8,5
3	8,6	8,3	8,1	8,5	8,4
4	8,3	8,4	8,1	8,6	8,3
5	8,4	8,5	7,4	8,5	8,3

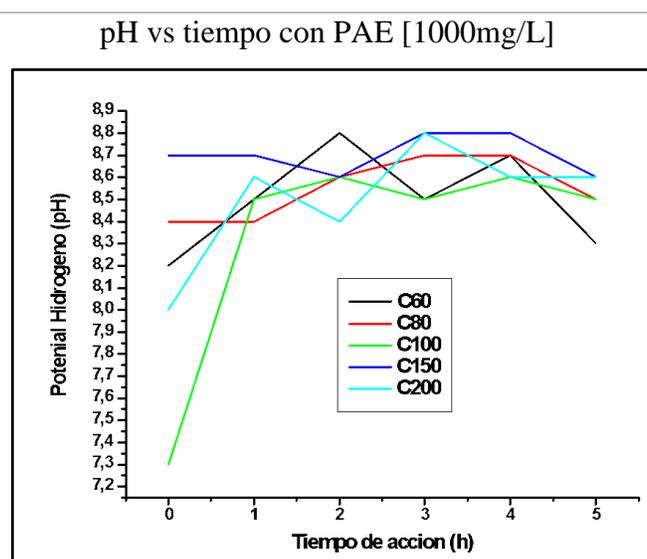


- Resultados de pH para PAE [1000mg/L] y Todas las Concentraciones de Colorante.

Tabla 16

*pH desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [1000]*

Tiempo (h)	Concentración colorante(mg/L)				
	60	80	100	150	200
0	8,2	8,4	7,3	8,7	8
1	8,5	8,4	8,5	8,7	8,6
2	8,8	8,	8,6	8,6	8,4
3	8,5	8,7	8,5	8,8	8,8
4	8,7	8,7	8,6	8,8	8,6
5	8,3	8,5	8,5	8,6	8,6



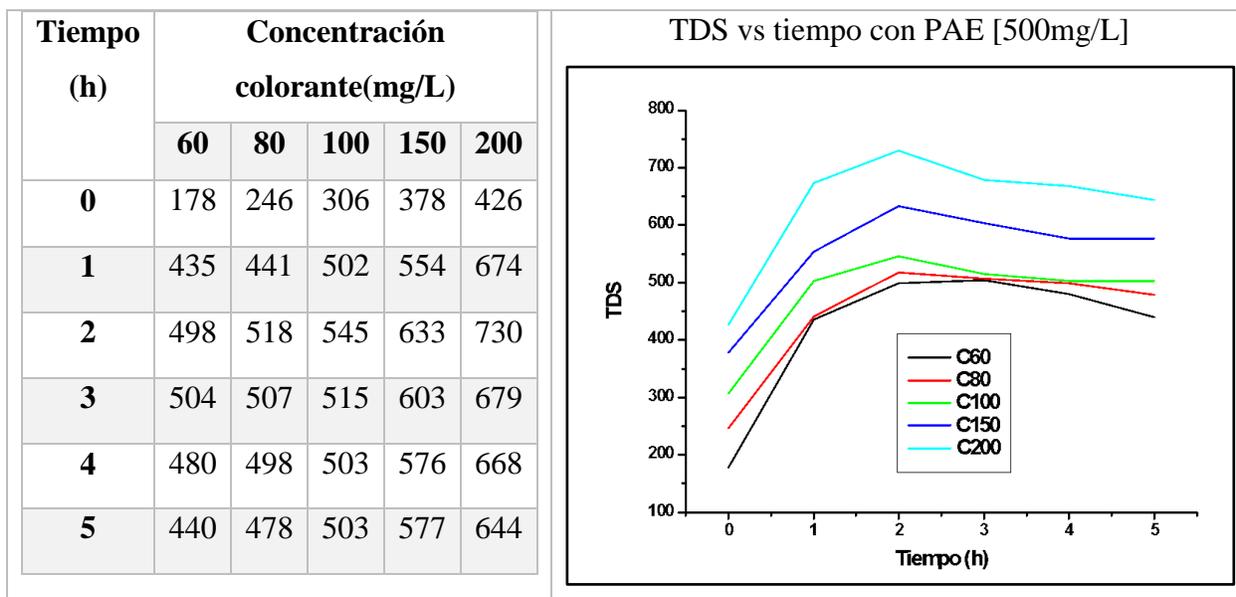
Los tratamientos realizados para cada una de las concentraciones de colorante definidas con la concentración de aluminato [500mg/L] dieron como resultado diferentes datos de pH que se encuentran por debajo del rango del pH conocido del colorante lo cual nos permite inferir que con este tratamiento se torna menos básico el pH de la muestra mejorando la remoción mientras que con la concentración de [1000mg/L] se torna más básico el pH lo cual puede contribuir a una remoción menos efectiva teniendo en cuenta que el catalizador es más efectivo en medios cercanos a un pH ácido (Torres, 2013d).

#### 4.2.2. *Solidos Disueltos Totales (TDS)*

- **Resultados de TDS para PAE [500mg/L] y todas las Concentraciones de Colorantes**

**Tabla 17**

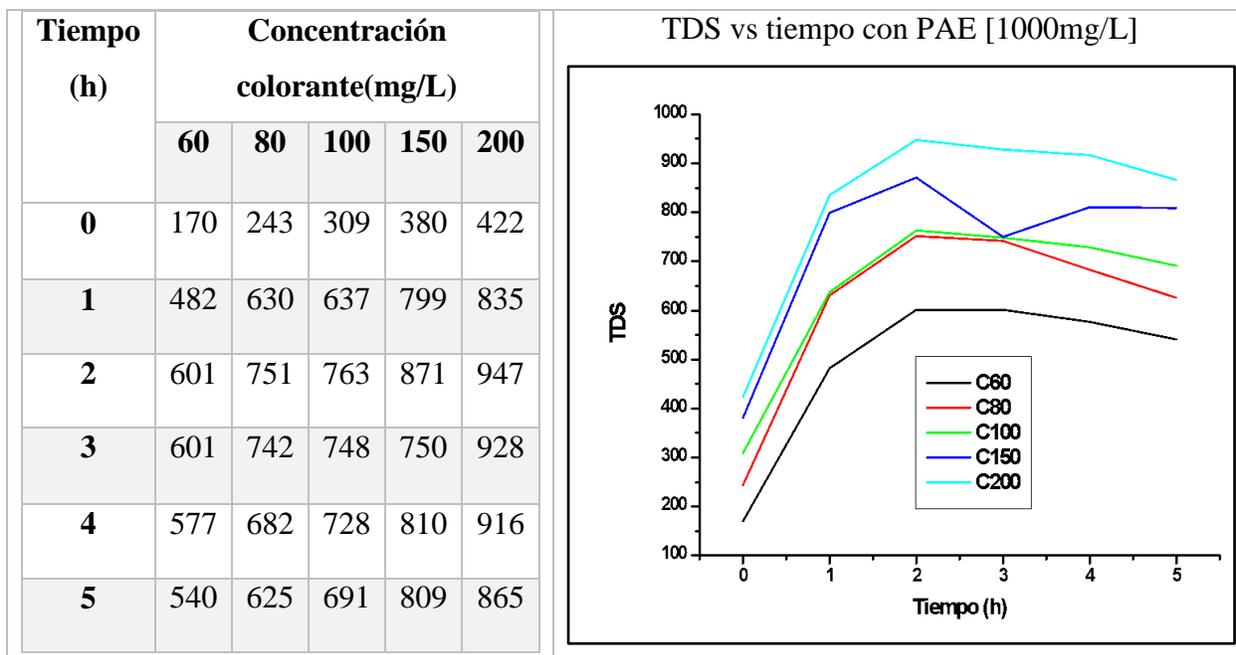
*TDS desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [500]*



- **Resultados de TDS para PAE [1000mg/L] y todas las concentraciones de colorantes**

**Tabla 18**

*TDS desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [1000]*



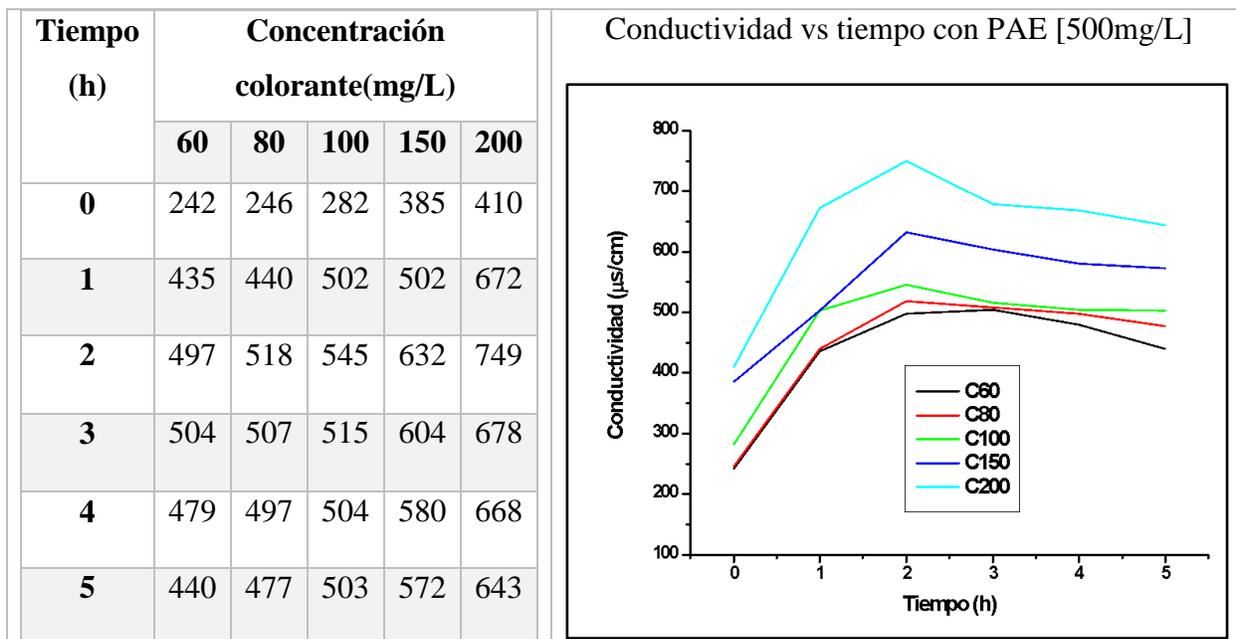
Los TDS obtenidos para el tratamiento con catalizador [500mg/L], son más bajos en comparación con los de [1000mg/L] esto nos indica que la segunda concentración de catalizador está en exceso generando saturación de esta en las muestras, ya que sus partículas quedan suspendidas en el agua y no absorben las partículas de colorante adecuadamente, lo cual puede contrarrestar en la efectividad de remoción del colorante y según lo reportado (Lenntech, 2021) el aumento de los sólidos disueltos totales puede deberse a que la temperatura del agua influye en la concentración de estos de tal manera que a mayor temperatura mayor cantidad de TDS y en nuestro proyecto al usar una lámpara directa sobre las muestras se presenta aumento de temperatura en las mismas.

#### 4.2.3. Conductividad

- **Resultados de Conductividad para PAE [500mg/L] y todas las concentraciones de colorantes**

**Tabla 19**

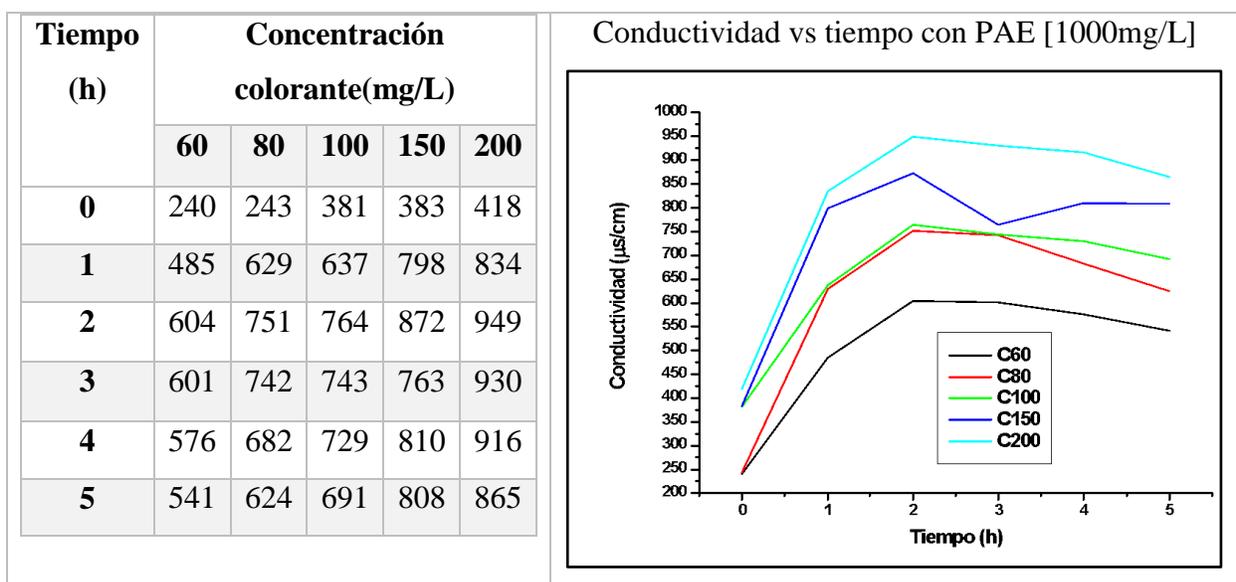
Conductividad desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [500]



- Resultados de Conductividad para PAE [1000mg/L] y todas las concentraciones de colorantes

**Tabla 20**

Conductividad desde el tiempo 0 hasta la 5 hora [1000]



El catalizador usado en el presente trabajo es un semiconductor por lo tanto las conductividades halladas para cada concentración durante su proceso de tratamiento tanto con [500] y [1000] mg/L esta entre el rango de semiconductor que es entre 10-11 y 105 S/cm estos al aplicarse una energía foto lumínica externa se convierten en conductores generando así el electrón hueco que es el aceptor del colorante (Universidad de las Americas, 2020).

El agua usada como base para la preparación de las muestras de este proyecto es agua destilada la cual no suele tener impurezas por ende baja conductividad. Las lecturas de conductividad de esta agua de como resultado las impurezas que esta contiene, que vienen siendo datos similares TDS ya que estas son las mismas partículas disueltas totales tanto de catalizador con colorante como de catalizador en exceso (Payeras, 2011).

### **Relación entre tiempo, concentración de PAE y colorante**

Para las relaciones entre el tiempo, concentraciones del polvo y del colorante se tuvo en cuenta el test de jarras de (Laboratorios agua SENA blogspot, 2015) el cual usa la ecuación 18 para el cálculo de dosis de descarga esta se adecua para obtener la posible ecuación para el cálculo de concentración del catalizador PAE en este caso necesario para remover cierta concentración de colorante (obtenida mediante el análisis de absorbancia) en un tiempo estimado de tratamiento la cual quedaría de la siguiente forma:

$$Dosis\ de\ Descarga\ \left(\frac{ml}{s}\right) = \frac{Q * Dosis\ Test\ de\ jarras\ \left(\frac{mg}{L}\right)}{Concentración\ coagulante\ \left(\frac{mg}{ml}\right)} \quad (21)$$

$$[CT]\left(\frac{mg}{h}\right) = \frac{V_A * [C_r]}{t_R} \quad (22)$$

Donde

CT: catalizador

$V_A$ : volumen de agua a tratar

$C_r$ : concentración real de colorante

$t_R$ : tiempo estipulado para el tratamiento o remoción

A partir de la ecuación 22 se obtiene la relación entre concentración de catalizador, colorante y tiempo de remoción siendo las relaciones las siguientes:

El tiempo de reacción es inversamente proporcional a la cantidad de catalizador necesaria para el tratamiento ya que entre mayor sea el plazo de acción menor cantidad de PAE será necesario. La Concentración del colorante es directamente proporcional con la del catalizador entre más carga contaminante orgánico contenga la sustancia o muestra mayor cantidad de catalizador será necesaria para su absorción.

### 4.3. Objetivo 3

**Establecer las absorbancias de las muestras de agua en el laboratorio de Calidad Ambiental mediante Espectrofotometría UV-vis para la determinación de la eficiencia de remoción de colorante.**

Inicialmente se habían establecido dos concentraciones de colorante inferiores a [60 mg/L], estas fueron descartadas debido a que se observó en el laboratorio que la eficiencia en la concentración de [60 mg/L] ya era muy buena, ya que presenta un porcentaje de eficiencia del 100% desde la primera hora de tratamiento; por lo tanto, se sustituyeron las dos concentraciones de [40 y 20] mg/L por dos más altas [150 y 200]mg/L partiendo desde la concentración mayor establecida inicialmente [100mg/L]. A cada muestra preparada de colorante se le realizó la medición de absorbancia posterior a su tratamiento con los PAE. Teniendo en cuenta todos los cinco tiempos trabajados de remoción y las dos diferentes concentraciones del catalizador para cada concentración de colorante [60, 80, 100, 150,200] mg/L y a partir de las absorbancias

obtenidas se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción calculado usando la ecuación 14 como se presenta en la tabla 21.

**Tabla 21**

*Eficiencia de remoción*

<b>Co [Colorante] mg/L</b>	<b>[Aluminato mg/L]</b>	<b>[Aluminato g/L]</b>	<b>T (tiempo)</b>	<b>Abs (<math>\mu</math>.a)</b>	<b>Eficiencia %</b>
<b>200</b>	500	0,5	0	0,463	0%
			1	0,089	81%
			2	0,025	95%
			3	0,005	99%
			4	0,003	99%
	5	0	100%		
	1000	1	1	0,081	83%
			2	0,067	86%
			3	0,053	89%
			4	0,009	98%
5			0,004	99%	
<b>150</b>	500	0,5	0	0,257	0%
			1	0,009	96%
			2	0,002	99%
			3	0,001	100%
			4	0	100%

<b>Co</b> <b>[Colorante]mg/L</b>	<b>[Aluminato mg/L]</b>	<b>[Aluminato g/L]</b>	<b>T</b> <b>(tiempo)</b>	<b>Abs</b> <b>(<math>\mu</math>.a)</b>	<b>Eficiencia</b> <b>%</b>
<b>150</b>	500	0,5	5	0	100%
			1	0,01	96%
			2	0,009	96%
	1000	1	3	0,005	98%
			4	0,004	98%
			5	0,004	98%
<b>100</b>	500	0,5	0	0,237	0%
			1	0,006	97%
			2	0,002	99%
			3	0,002	99%
			4	0,002	99%
			5	0,001	100%
	1000	1	1	0,012	95%
			2	0,008	97%
			3	0,003	99%
			4	0,001	100%
			5	0	100%
			0	0,173	0%
<b>80</b>	500	0,5	1	0,006	97%
			2	0	100%

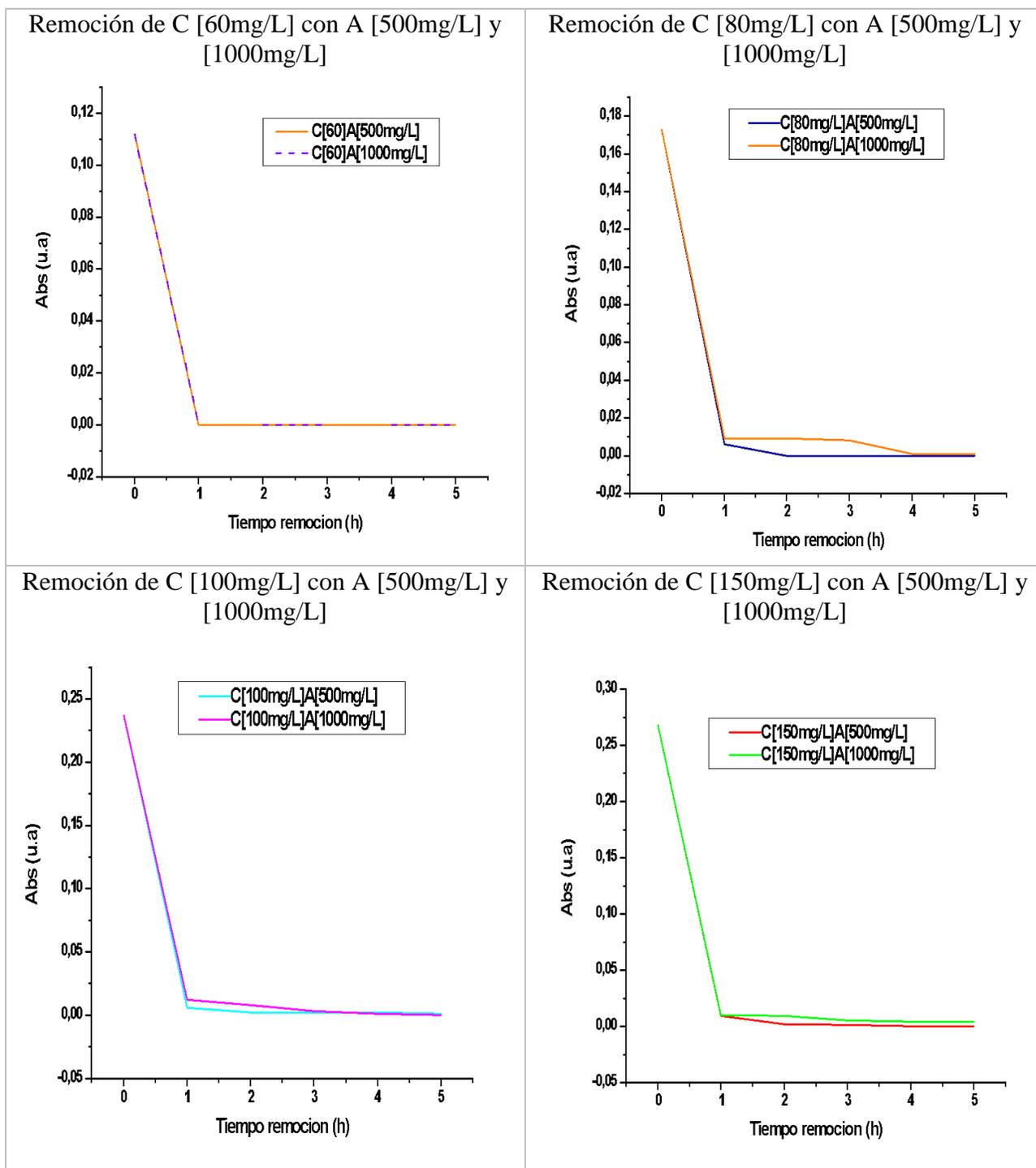
<b>Co [Colorante]</b> <b>mg/L</b>	<b>[Aluminato mg/L]</b>	<b>[Aluminato g/L]</b>	<b>T</b> <b>(tiempo)</b>	<b>Abs</b> <b>(μ.a)</b>	<b>Eficiencia</b> <b>%</b>	
<b>80</b>	500	0,5	3	0	100%	
			4	0	100%	
			5	0	100%	
	1000	1	1	0,009	95%	
			2	0,009	95%	
			3	0,008	95%	
			4	0,001	99%	
			5	0,001	99%	
			0	0,112	0%	
	<b>60</b>	500	0,5	1	0	100%
				2	0	100%
				3	0	100%
				4	0	100%
				5	0	100%
		1000	1	1	0	100%
2				0	100%	
3				0	100%	
4				0	100%	
5				0	100%	

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 21 se analiza que para la concentración de colorante 200mg/L la remoción alcanza el 100% de efectividad a la quinta hora con el catalizador de 500mg/L mientras que para 1000mg/L no alcanza a llegar al 100% de efectividad; para el colorante de 150 mg/L se logra la efectividad del 100% a partir de la tercera hora de remoción con la concentración de PAE de 500 mg/L mientras que para la de 1000mg/L al igual que la anterior no alcanzo la efectividad del 100%; para la concentración de 100 mg/L la remoción alcanzo el 100% a la quinta hora usando el catalizador a 500 mg/L mientras que con 1000 mg/L en este caso se logró el 100% de efectividad después de la cuarta hora; la concentración de 80 mg/L de colorante a partir de la 2 hora llegó al 100 % de efectividad y con 1000 mg/L no; finalmente la concentración de 60 mg/L de colorante obtuvo la máxima remoción de colorante desde la primera hora de remoción tanto con la concentración de aluminato de 500mg/L como con el de 1000mg/L.

De los datos anteriores se realizan las gráficas que se presentan a continuación en la tabla 22 de Absorbancia Vs Tiempo de remoción, también se muestran las gráficas en la tabla 23 de la eficiencia de remoción vs tiempo para comparar la eficiencia de remoción de colorante frente a las dos distintas concentraciones del catalizador.

Tabla 22

Gráficas de remoción del colorante con PAE



Remoción de C [200mg/L] con A [500mg/L] y [1000mg/L]

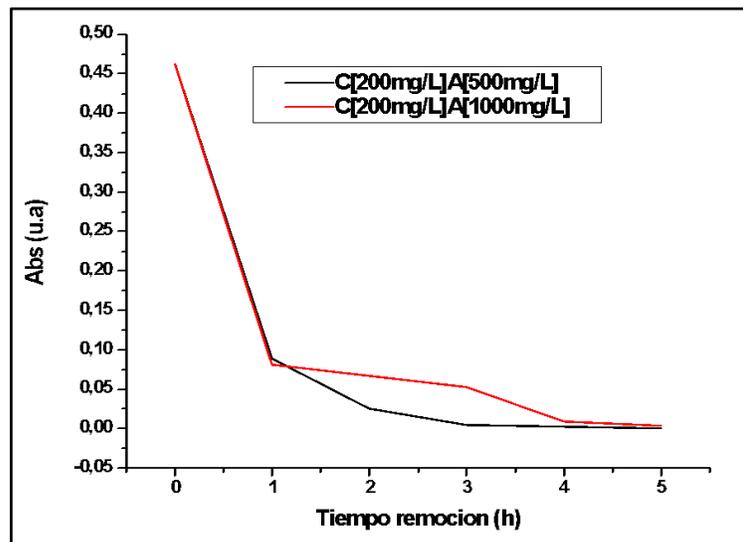


Tabla 23

% eficiencia de remoción vs tiempo



Verificando el comportamiento de la absorbancia Vs el tiempo de remoción en las gráficas se puede decir que la efectividad del tratamiento para la remoción del colorante es mejor con la concentración de catalizador de 500 mg/L ya que se observa que los picos de absorbancia descienden significativamente, indicando que hay menor cantidad de partículas suspendidas o colorante diluido en el agua a medida que pasa el tiempo.

Dando cumplimiento a lo establecido en la resolución 0631 de 2015 (Minambiente, 2015) en la cual se establece que los responsables de la actividad deben encargarse de realizar el respectivo análisis y reporte para las siguientes longitudes de onda (436, 525 y 620) nm para el parámetro de color real se muestran los resultados de análisis de las mismas obtenidas en el presente proyecto.

**Tabla 24**

*Reporte de absorbancias de acuerdo a la resolución 0631 del 2015*

Longitudes de onda (nm)	Concentración de colorante (mg/L) sin tratamiento				
	60	80	100	150	200
436	0,034	0,059	0,083	0,086	0,149
525	0,089	0,142	0,198	0,22	0,384
620	0,08	0,124	0,17	0,189	0,327
Longitudes de onda (nm)	Concentración de colorante (mg/L) con tratamiento A[500mg/L]				
	60	80	100	150	200
436	0	0,001	0	0	0
525	0	0	0	0	0
620	0	0	0,001	0	0

Para complementar el cumplimiento del objetivo se realizó a su vez la determinación de la rapidez de decoloración usando el cálculo real de concentración de colorante obtenido de la ecuación 17; no la de Lambert Beer ya que se observa que la de Beer es menos aproximada, el cálculo de degradación se realizó para todos los tiempos (es decir para la una, dos, tres, cuarta y quinta hora), pero para el análisis se tomaron los datos de la hora uno y cinco, ya que comparando la concentración real de estos dos tiempos con la concentración inicial se puede observar la evolución temporal durante el proceso de degradación del iris azul directo 151. En la tabla 25 se muestran los resultados de los cálculos realizados.

**Tabla 25**

*Rapidez de degradación*

<b>Resultados rapidez de degradación</b>					
<b>C<sub>o</sub></b> <b>Colorante</b> <b>[mg/L]</b>	<b>Aluminato</b> <b>[mg/L]</b>	<b>Tiempo</b> <b>(horas)</b>	<b>Abs</b> <b>(u.a)</b>	<b>C<sub>real</sub></b> <b>Colorante</b> <b>[mg/L]</b>	<b>Rapidez de</b> <b>decoloración</b> <b>(C/C<sub>o</sub>)</b>
<b>200</b>	500	1	0,089	50,6666	0,2533
		5	0	13,5833	0,06791
	1000	1	0,081	47,3333	0,2366
		5	0,004	15,25	0,07625
<b>150</b>	500	1	0,009	17,3333	0,1155
		5	0	13,5833	0,0905
	1000	1	0,01	17,75	0,1183
		5	0,004	15,25	0,1016
<b>100</b>	500	1	0,006	16,0833	0,1608
<b>Resultados rapidez de degradación</b>					

<b>C<sub>o</sub></b> <b>Colorante</b> <b>[mg/L]</b>	<b>Aluminato</b> <b>[mg/L]</b>	<b>Tiempo</b> <b>(horas)</b>	<b>Abs</b> <b>(u.a)</b>	<b>C<sub>real</sub></b> <b>Colorante</b> <b>[mg/L]</b>	<b>Rapidez de</b> <b>decoloración</b> <b>(C/C<sub>o</sub>)</b>
<b>100</b>	500	5	0,001	14	0,14
		1	0,012	18,5833	0,1858
	1000	5	0	13,5833	0,1358
<b>80</b>	500	1	0,006	16,0833	0,2010
		5	0	13,5833	0,1697
	1000	1	0,009	16,5564	0,2069
		5	0,001	14	0,175
		5	0	13,5833	0,2263
<b>60</b>	500	1	0	13,5833	0,2263
		5	0	13,5833	0,2263
	1000	1	0	13,5833	0,2263
		5	0	13,5833	0,2263

Para todas las concentraciones analizadas se observa que la rapidez de decoloración es mayor a la primera hora, mientras que para la quinta ya se denota la disminución de la misma, lo cual indica la decoloración obtenida, es decir entre más alta sea la rapidez de decoloración mayor va a ser la cantidad de colorante removido; por lo tanto, la mejor decoloración obtenida fue para la concentración de [60 mg/L].

## 5. Conclusiones

El uso de aluminato de estroncio dopado con europio y disprosio con estructura monoclinica mostro buenas efectividades de remoción en el tratamiento de aguas tinturadas con colorante azul directo 151 siendo estas superiores al 95% en todos los tratamientos, gracias a sus propiedades químicas, morfológicas y estructurales que permiten absorber el contaminante orgánico.

Los resultados fueron eficientes trabajando el tratamiento en medio básico con PH entre el rango de 7-9, esto pudo deberse a la incidencia permanente de la lámpara sobre el agua a tratar, que permite la fácil adhesión del contaminante al catalizador mejorando el proceso de remoción, a su vez se puede deducir que la remoción fue más efectiva para el tratamiento realizado con aluminato de estroncio en concentración de 500 mg/L ya que con esta concentración se obtuvieron mejores porcentajes de remoción.

El exceso del fotocatalizador usado disminuye la velocidad de reacción por ende disminuye la eficiencia de remoción por lo tanto la cantidad necesaria de este para remover el contaminantes es mínima generando una relación costo beneficio buena ya que la cantidad y el costo en mercado del catalizador usado es bajo en comparación del costo del  $\text{TiO}_2$  catalizador mayormente usado y estudiado para tratamientos de agua como el realizado, mostrando que se puede innovar y aplicar nuestro método con efectividades altas de remoción y costos menores bajos.

## **Capítulo 6. Recomendaciones**

Tener en cuenta el uso de equipos calibrados para que los datos obtenidos de estos sean más certeros y confiables.

Una vez preparadas las muestras a tratar iniciar su proceso de remoción de forma continua ya que se observó que cuando el proceso se dejaba en reposo por tiempos muy largos influye de forma negativa en la remoción del contaminante.

Usar los implementos personales de laboratorio para evitar accidentes y la contaminación de las muestras o equipos usados.

Realizar continuos lavados de los implementos usados en el laboratorio en los procesos de preparación para evitar contaminaciones cruzadas entre muestras.

## Referencias

- Aguirre Cedillo, F. J. (2019). *ESTUDIO DE FOTOCATALIZADORES NANOESTRUCTURADOS [SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:LnX Y TiO<sub>2</sub>] PARA LA POSIBLE ELIMINACIÓN DE Cr<sup>6+</sup> EN EFLUENTES DE TENERÍA*. [Centro de investigación en óptica].  
<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/1122/1/17825.pdf>
- Al-Mamuna, M. R., Kader, S., Islamb, M. S., & Khana, M. Z. H. (2019). Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO<sub>2</sub> photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. *Ingeniería Química Ambiental*, 7.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Photocatalytic-Activity-Improvement-and-Application-Al-Mamun-Al-Mamun/7fd3b703c9592abce8a7b5be74ec6e5320aec374>
- Amaro, J. (2006). *Energía de los fotones*. Universidad de Granada.  
<https://www.ugr.es/~amaro/radiactividad/tema1/node6.html>
- Anesh, M. P., Gulrez, S. K. H., Anis, A., Shaikh, H., Mohsin, A. M. E., & AL-Zahrani, S. M. (2014). Developments in Eu<sup>2+</sup>- Doped Strontium Aluminate and Polymer/Strontium Aluminate Composite. *Advances in Polymer Technology*, 33.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adv.21436>
- Bahadur, N., & Bhargava, N. (2019). Novedoso tratamiento fotocatalítico a escala piloto de aguas residuales de la industria textil y de teñido para lograr la calidad del agua de proceso y permitir una descarga cero de líquidos. *Ingeniería de Aguas de Procesos*, 1–5.
- Ballari, M. de los M. (2008). *MODELADO Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DIFUSIVOS EN PROCESOS FOTOCATALÍTICOS CON RADIACIÓN UV EN MEDIOS ACUOSOS* [Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química Universidad Nacional del Litoral].  
<http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/bitstream/handle/11185/74/Tesis.pdf>
- Battiston, S., Rigo, C., Severo, E. da C., Mazutti, M. A., Kuhn, R. C., Gündel, A., & Foletto, E. L. (2014). Synthesis of zinc aluminate (ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) spinel and its application as photocatalyst. *SciELO*, 17. [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392014000300028&lng=en&nrm=iso](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392014000300028&lng=en&nrm=iso)
- Bazan, B., Barandika, G., Calderon-Casado, A., Fidalgo- Marijuan, A., LLano-Tomé, F.,

- Urtiaga, M.-K., & Arriortua, Ma.-I. (2012). Metodologías Sintéticas para la Obtención de compuestos de coordinación metal-orgánicos. *Sociedad Española de Minerología*, 1.
- Benavides Rivera, V. (2015). *DISEÑO DEL PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA TEXTIL ARITEX DE COLOMBIA S.A.*  
<https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/7875/1/T05873.pdf>
- Bolufer, P. (2014). *MOF, el polímero espumoso con nanoporos*. Canales Sectoriales Química.  
<https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/130958-MOF-el-polimero-espumoso-con-nanoporos.html>
- Borges, M. E., Sierra Ramos, M., Méndez-Ramos, J., Acosta-Mora, P., Ruiz-Morales, J. C., & Esparza, P. (2016). Solar degradation of contaminants in water: TiO<sub>2</sub> solar photocatalysis assisted by up-conversion luminescent materials. *Isolar Energy Materials and Solar Cells*, 155, 194–201.
- Bougdoor, N., Tiskatine, R., Bakas, I., & Assabbane, A. (2019). La degradación fotocatalítica de aguas residuales textiles industriales usando procesos S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>/Fe<sup>2+</sup>. *Elsevier*, 1–4.
- Cangzhou Xincheng Weiye Chemical. (2010). *Direct blue 151*.  
<http://www.xcwydyes.com/direct-blue-151.html>
- Castells, X. E., García Martínez, J., López, M., & Soliva Torrentó, M. (2009). Tecnologías aplicables al tratamiento de residuos. Valoración y fabricación de materiales a partir de residuos. *Dialnet*, 91–172.
- Curia, M. (2010). *Técnicas de Caracterización. Conceptos Generales*.  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV\\_-\\_Técnicas\\_de\\_caracterización.\\_Conceptos\\_generales.pdf?sequence=8&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV_-_Técnicas_de_caracterización._Conceptos_generales.pdf?sequence=8&isAllowed=y)
- EcuRed. (n.d.). *Tratamiento de aguas residuales*.
- EcuRed. (2020). *Radiación ultravioleta*. EcuRed.  
[https://www.ecured.cu/index.php?title=Radiación\\_ultravioleta&oldid=3792679](https://www.ecured.cu/index.php?title=Radiación_ultravioleta&oldid=3792679)
- Fajardo, J. J., Caicedo, R., & Pinilla, J. P. (2018). *CURVA DE CALIBRACIÓN*.  
[https://www.academia.edu/37439349/Lab\\_IQ\\_1\\_CURVA\\_DE\\_CALIBRACION](https://www.academia.edu/37439349/Lab_IQ_1_CURVA_DE_CALIBRACION)
- Faraldos Izquierdo, M. (2016). Fotocatálisis: nanomateriales para combatir la contaminación y

- obtener energía. *Grupo Español Carbón*, 9–11.
- Figueroa, D., Moreno, A., & Hormaza, A. (2014). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos. *Scielo*, 106–120. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n26/v14n26a08.pdf>
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582.
- García Pérez, U. M., & Martínez- De la Cruz, A. (2010). Síntesis por coprecipitación de BiVO<sub>4</sub> y evaluación de su actividad fotocatalítica en la degradación de rodamina B. *Ingenierías*, 13(0), 8–15. [http://eprints.uanl.mx/10429/1/46\\_Sintesis.pdf](http://eprints.uanl.mx/10429/1/46_Sintesis.pdf)
- Gil Pavas, E., Medina, J., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez, M. Á. (2016). Degradación de Colorante Amarillo 12 de Aguas Residuales Industriales utilizando Hierro Cero Valente, Peróxido de Hidrógeno y Radiación Ultravioleta. *SciElo*, 27, 23–34. [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0718-07642016000300004&lng=es&nrm=iso](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-07642016000300004&lng=es&nrm=iso)
- Gutiérrez Guzman, N., Valencia Granada, E., & Aragon Calderon, R. A. (2014). EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO<sub>5</sub> Y SS EN SEDIMENTADOR Y LECHO FILTRANTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO DE CAFÉ (*Coffea arabica*). *Scielo*, 17. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-07392014000200003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392014000200003)
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*.
- Huang, G., Yang, H.-H., & Lu, C.-H. (2019). MAGNETIC NANOMATERIALS FOR MAGNETIC BIOANALYSIS. *Capítulo 3*, 89–109.
- IDEAM Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (n.d.). *Agua*.
- Infiltró Airguard. (2014). *Desinfección del aire con luz ultravioleta*. Infiltró Airguard. <http://www.infiltró.es/index.php/infiltró-filtros-de-aire-productos/desinfeccion-de-virus-bacterias-y-hongos-mediante-luz-ultravioleta>
- Laboratorios agua SENA blogspot. (2015). *Test de jarras*. Laboratorios Agua SENA Blogspot. <http://laboratoriosaguasena.blogspot.com/2015/05/test-de-jarras.html>
- Lenntech. (2021). *TDS y conductividad eléctrica*.

<https://www.lenntech.es/calculadoras/tds/tdsyconductividad-electrica.htm>

López, J. P., Velazco, M., Solano, N., Martínez, A. M., & Sabino, J. (n.d.). *Lámparas Germicidas UV*. Universidad de Los Andes Facultad de Arquitectura y Diseño Desing Blog. <http://designblog.uniandes.edu.co/blogs/dise2308/files/2011/09/GERMICIDAL-LIGHT1.pdf>

López Pulido, E. H. (2018). *CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE ESCORIAS DE FERRONÍQUEL APARTIR DE MINERALES LATERÍTICOS DE BAJO TENOR PARA POSIBLES USOS INDUSTRIALES*. UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.

Lucioni Corzo, A., & Vega–Baudrit, J. (2012). Estudio cinetico de la degradacion fotocatalitica oxidativa de colorantes empleados en la industria textilera. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13, 60–68. <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/ABR12/lucioni.pdf>

Manrique Losada, L., Laguna Castillo, E. J., Osorio Restrepo, E. A., Serna Galvis, E. A., & Torres Palma, R. A. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocátalisis con TiO<sub>2</sub> usando luz artificial y solar. *Produccion Mas Limpia*, 12(0), 51–60.

Marini, S., Blesio, G., & Godino, M. E. (2015). *MODELO ATÓMICO DE EMISIÓN Y DE ABSORCIÓN DE FOTONES*. Instituto Politecnico Univerdiad Nacional Del Rosario. [http://www.rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/4905/7101-15\\_FISICA\\_Modelo\\_atómico\\_de\\_absorción\\_y\\_emisión\\_de\\_fotones.pdf?sequence=2](http://www.rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/4905/7101-15_FISICA_Modelo_atómico_de_absorción_y_emisión_de_fotones.pdf?sequence=2)

Minambiente. (2015). *Resolucion 0631 del 2015*. Resolucion 0631 Del 2015. [http://www.aguasdebuga.net/intranet/sites/default/files/Resolución 0631 de 2015-Calidad vertimientos.pdf](http://www.aguasdebuga.net/intranet/sites/default/files/Resolución_0631_de_2015-Calidad_vertimientos.pdf)

MinDesarrollo. (2000). *Agua residual*. [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710\\_ras\\_titulo\\_e\\_.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf)

Ministro de Desarrollo Economico. (2002). *DECRETO 1713 DE 2002*. [https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/decreto\\_1713\\_2002.htm](https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/decreto_1713_2002.htm)

Nevárez-Martínez, M. C., Espinoza-Montero, P. J., Quiroz, F., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO<sub>2</sub>. *Avances En Química*, 12.

- Paredes Roa, R. A., Roa Bohorquez, K. L., & Rodriguez, G. P. (2019). Characterization of commercial luminescent powders. *Physics Conference Series*.  
[https://www.researchgate.net/publication/337611005\\_Characterization\\_of\\_commercial\\_luminescent\\_powders](https://www.researchgate.net/publication/337611005_Characterization_of_commercial_luminescent_powders)
- Park, B. G. (2018). Photocatalytic behavior of strontium aluminates co-doped with europium and dysprosium synthesized by hydrothermal reaction in degradation of methylene blue. *Catalysts*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/catal8060227>
- Patarroyo Hernández, E. M. (2013). PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS GENERADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL EN COLOMBIA MEDIANTE LODOS ACTIVADOS. *Universidad Militar Nueva Granada*, 1–33.  
[https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10862/PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS GENERADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL EN COLOMBIA MEDIANTE LODOS ACTIVADOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10862/PROCESOS_DE_ESTABILIZACION_DE_RESIDUOS_GENERADOS_EN_LA_INDUSTRIA_TEXTIL_EN_COLOMBIA_MEDIANTE_LODOS_ACTIVADOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Payeras, A. (2011). *Parámetros de Calidad de las Aguas de Riego*. Bonsai Menorca.  
<http://www.bonsaimenorca.com/articulos/articulos-tecnicos/parametros-de-calidad-de-las-aguas-de-riego/>
- Ria, N., & Ritu, V. (2013). Comparative Study of Removal of Colour from Textile Waste Water using Trivalent & Bivalent Metal Ions (Coagulation). *IJRSAT*, 5(2), 176–181.
- Rojas Hernández, R. E. (2015). *Diseño y síntesis de materiales nanoestructurados basados en aluminatos de estroncio con propiedades fotoluminiscentes*. <http://oa.upm.es/38330/>
- Ruiz Velásquez, R. O. (2019). Diseño de un prototipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas residuales en la industria textil de Cúcuta. *Universidad Libre*, 1–23.  
[https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17631/DISEÑO PROTOTIPO PLANTA OSMOSIS INVERSA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17631/DISEÑO_PROTOTIPO_PLANTA_OSMOSIS_INVERSA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sanz Tejedor, A. (2020). *La industria de los colorantes y pigmentos*.  
<https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-11.php>
- Soler Uribe, E. A., & Prieto Bernal, W. J. (2019). *Evaluación de una propuesta de un sistema de tratamiento para el agua residual industrial generada en una empresa de Saborizantes*.
- Torres López, C. Y. (2013). *Fotocatalisis en nanotubos metaestables de TiO2 sobre electrodos*

*de Ti para la degradación de naranja de metilo.*

Trojan UV water confidence. (2020). *APLICACIONES/AGUAS RESIDUALES Introducción a la desinfección por UV*. Trojan UV Water Confidence. <https://www.trojanuv.com/es/uv-basics?acceptCookies=1>

Universidad de las Americas. (2020). *Fotocatalisis*.

[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lin/gonzalez\\_espinoza\\_1/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lin/gonzalez_espinoza_1/capitulo2.pdf)

Universidad de Valencia. (2010). *Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea*.

Departamento de Química Física. [http://ocw.uv.es/ciencias/3-](http://ocw.uv.es/ciencias/3-2/tema_7_parte_1_ads_completa.pdf)

[2/tema\\_7\\_parte\\_1\\_ads\\_completa.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias/3-2/tema_7_parte_1_ads_completa.pdf)

Universidad Politecnica de Catalunya Barcelonatech. (n.d.). *BLOQUE 1 INTRODUCCIÓN Y*

*FUNDAMENTOS*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4429/anexo>

[1.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4429/anexo)

Vasquez Sanchez, J. carlos. (2010). *Etapas en una reacción catalítica*.

<https://es.slideshare.net/Californio89js/etapas-en-una-reaccin-cataliticabueno-15128479>

Vilaseca, M., López-Grimau, V., Gutiérrez-Bouzán, C., & Crespi, M. (2015). MÉTODOS DE ELIMINACIÓN DEL COLOR EN EFLUENTES DE TINTURA TEXTIL. *Universidad Politecnica de Catalunya Barcelonatech*, 1–10.

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28332/Vilaseca,+Merc%E8.+M%E9todos+de+eliminaci%F3n+del+color+en+efluentes+de+tintura+textil.pdf;jsessionid=17F572AF906BFB042054F83D6CDA8D64?sequence=3>

World dye variety. (2012). *Direct Blue 151*. <http://www.worlddyevariety.com/direct-dyes/direct-blue-151.html>

## **Apéndices**

**Apéndice A. Registro de Fotográfica Preparación de Muestras**  
**Pesado colorante**



Colorante [300mg/L]

Colorante [250mg/L]

Colorante [200mg/L]

Colorante [150mg/L]



Colorante [100mg/L]

Colorante [80mg/L]

Colorante [60mg/L]

**Pesado aluminato**



## Agregación y mezcla de colorante



Colorante [300mg/L]

Colorante [250mg/L]

Colorante [200mg/L]

Colorante [150mg/L]



Colorante [100mg/L]

Colorante [80mg/L]

Colorante [60mg/L]

## Aluminato sobrenadante en agua tinturada



Fuente: Autores

## Apéndice B. Registro Fotográfico Proceso de Tratamiento

### Montaje de tratamiento fotocatalítico



Colorante [200mg/L]=0,08g tratada con aluminato [500mg/L]=0,2g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [200mg/L]=0,08g tratada con aluminato [1000mg/L]=0,4g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [150mg/L]=0,06g tratada con aluminato [500mg/L]=0,2g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [150mg/L]=0,06g tratada con aluminato [1000mg/L]=0,4g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [100mg/L]=0,04g tratada con aluminato [500mg/L]=0,2g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [100mg/L]=0,04g tratada con aluminato [1000mg/L]=0,4g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [80mg/L]=0,032g tratada con aluminato [500mg/L]=0,2g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [80mg/L]=0,032g tratada con aluminato [1000mg/L]=0,4g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [60mg/L]=0,024g tratada con aluminato [500mg/L]=0,2g



1h

2h

3h



4h

5h

Colorante [60mg/L]=0,024g tratada con aluminato [1000mg/L]=0,4g



1h

2h

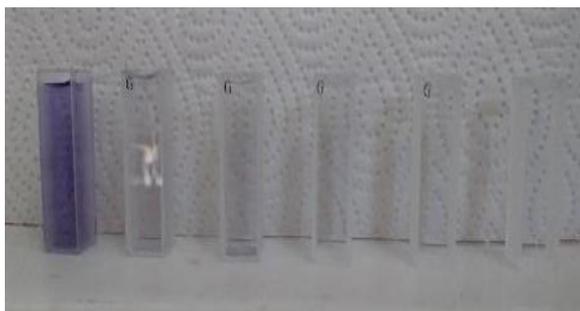
3h



4h

5h

Degradación a través del tiempo Colorante [200mg/L]

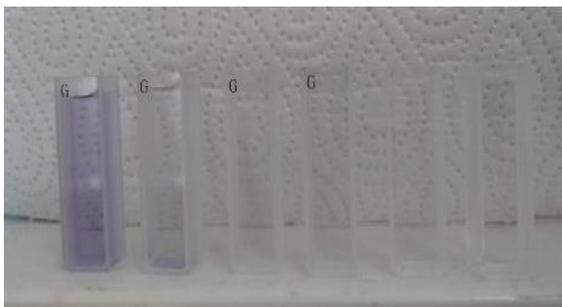


Aluminato [500mg/L]



Aluminato [1000mg/L]

## Degradación a través del tiempo Colorante [150mg/L]



Aluminato [500mg/L]



Aluminato [1000mg/L]

## Degradación a través del tiempo Colorante [100mg/L]



Aluminato [500mg/L]



Aluminato [1000mg/L]

## Degradación a través del tiempo Colorante [80mg/L]

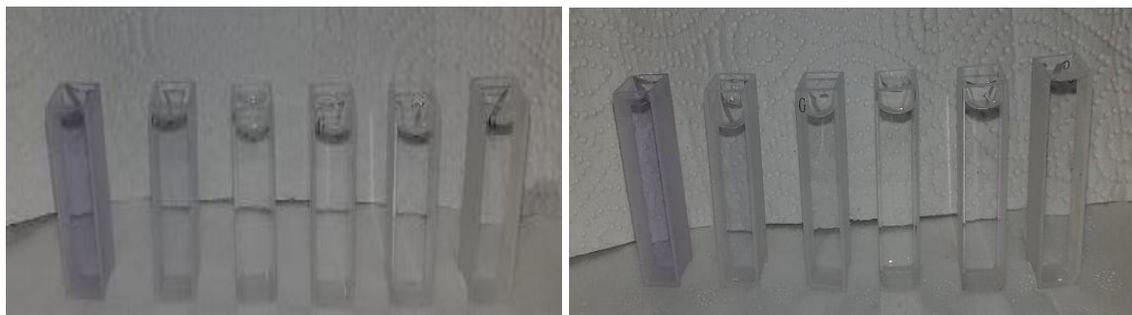


Aluminato [500mg/L]



Aluminato [1000mg/L]

## Degradación a través del tiempo Colorante [60mg/L]



Aluminato [500mg/L]

Aluminato [1000mg/L]

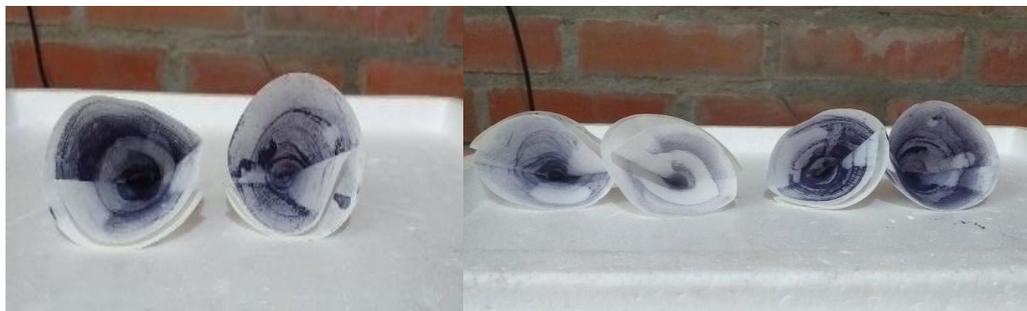
## Medición de parámetros criterio



## Filtrado de muestras tratadas



Filtros usados por [color] y [PAE]



C [200] A [500-1000] mg/L

C [100] A [500-1000] y C [150] A [500-1000] mg/L



C [60] A [500-1000] y C [80] A [500-1000] mg/L

Filtros usados por hora (1, 2, 3,4 y 5 respectivamente)



Aluminato [500]



Aluminato [1000]

Fuente: Autores

## Apéndice C. Registro Fotográfico Pruebas de Absorbancia

### Espectrofotómetro con celdas



Fuente: Autores

## **Apéndice D. Cálculos y Resultados Obtenidos**

Documento EXCEL1-RESULTADOS-parametros y cálculos