

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX TESIS

Degradación de colorantes potencialmente tóxicos utilizados en la industria textil, alimenticia y farmacéutica aplicando procesos de oxidación avanzada

**Que para obtener el Título de
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA

Keyla Alonso Alvirde

ASESOR (A) / DIRECTOR (A):
Dra. Bethsabet Jaramillo Sierra

Diciembre 25

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi asesora la *DRA. BETHSABET JARAMILLO SIERRA*, el acompañamiento académico que me brindó fue clave fundamental para el desarrollo de esta tesis, su paciencia, compromiso y claridad me ayudaron a salir adelante, enriquecer y concluir cada capítulo con éxito.

Pero no solo quiero agradecerle por el acompañamiento académico, sino también por la calidez humana que me brindó, gracias por escucharme, por ofrecerme palabras de aliento, por preocuparse y sobre todo muchas gracias por creer en mí. La amistad que nació en todo este proceso la atesoraré.

Gracias por ser mentora, apoyo y amiga.

A mis padres, que, gracias a su amor, confianza y perseverancia es que estoy aquí.

Papá siempre tuve presente tu fe como un abrazo silencioso que dispersaba los pensamientos negativos de mi mente y tu amor que fue un refugio y un recuerdo constante de que era capaz de lograr lo que me propusiera.

Mamá tu fuerza y tu valentía me ayudaron a confrontar los problemas y no quebrarme ante ellos, eres el pilar que me ayuda en mis malos días, gracias por enseñarme que la vida se vive con respeto, coraje y con una sonrisa.

A mi hermano menor, gracias por tu compañía, por cada gesto silencioso de amor que me brindabas, por las bromas y risas que llenaban mi mundo de luz y color, gracias por compartirme tu alegría como parada de descanso para mi dolor.

Y por último a mi hermano mayor, no encuentro las palabras para expresarte lo importante que eres en mi vida. Has sido mi guía, mi consuelo, mi protector, mi ejemplo y mi empuje para salir adelante, tus consejos llegaban cuando más los necesitaba y tus abrazos me devolvían la calma. No solo caminaste a mi lado, sino que también muchas veces me cargaste sin quejarte y sin juzgarme, gracias por ser mi fuerza cuando la mía no bastaba y enseñarme que nunca se está solo.

Este logro lleva el nombre de todos.

Resumen

El azul de Bromotimol (AB) es un colorante sintético químico sensorial utilizado para la identificación de gases y microorganismos, es empleado como un indicador químico, por otro lado, el Negro Ácido 58 se utiliza de manera comercial en la industria textil para el mejoramiento físico de los productos, el colorante Tartrazina proviene de la familia de los azoicos y es utilizado en la industria alimenticia y farmacéutica, sin embargo, estudios han comprobado que puede ser tóxico para el ser humano y el medio ambiente, al ser desechado a los efluentes representa una problemática ambiental. Se ha demostrado que la exposición prolongada de los seres vivos al AB daña el hígado, riñones y corazón, los métodos de tratamiento convencionales no son totalmente efectivos, requieren largos tiempos de tratamiento generando subproductos tóxicos, por lo que es de importancia la validación de métodos alternativos amigables con el medio ambiente.

En este trabajo se llevó a cabo la degradación de los contaminantes Azul de Bromotimol, Negro Ácido 58 y Tartrazina utilizando Procesos Homogéneos de Oxidación (O_3 , UV, H_2O_2) en sistemas simples y combinados, los cuales se caracterizan por la **tasa de generación** de radicales hidroxilos ($\bullet OH$) con un alto potencial de oxidación. Fue utilizado un reactor de espiral de vidrio, en la parte central se encuentra una lámpara que emite en el ultravioleta, se realizó una solución con 10 mg/L de los contaminantes por separado con un volumen de 500 ml es ingresada a un depósito e impulsada con una bomba peristáltica para su recirculación, la inyección del O_3 y H_2O_2 fue realizada en el depósito. El análisis del líquido residual fue efectuado mediante espectrometría UV-visible. En el caso del colorante Azul de Bromotimol se obtuvieron eficiencias de degradación de hasta 91% en el sistema O_3 /UV/1 ml H_2O_2 , y un 100% de eficiencia de decoloración. Los resultados son atribuidos a mecanismos cinéticos promotores de radicales OH y la colisión con el colorante generando su oxidación, por otro lado, los resultados del Negro Ácido 58 fueron favorables debido a la combinación O_3 /UV con una degradación del 88%, un 100% de eficiencia en decoloración, por último, en el proceso de degradación de la Tartrazina alcanzó un porcentaje de degradación del 62%, lamentablemente en todos los casos hubo degradaciones nulas o negativas.

Palabras Clave: peróxido de hidrógeno, ozono, radiación ultravioleta, agua.

Abstract

Bromothymol Blue (BB) is a chemosensory synthetic dye used for the identification of gases and microorganisms; it is employed as a chemical indicator. On the other hand, Acid Black 58 is used commercially in the textile industry for the physical enhancement of products. The dye Tartrazine comes from the azo family and is used in the food and pharmaceutical industries; however, studies have shown that it can be toxic to humans and the environment. When discharged into effluents, it poses a significant environmental problem.

It has been demonstrated that prolonged exposure of living organisms to BB damages the liver, kidneys, and heart. Conventional treatment methods are not completely effective; they require long treatment times and generate toxic byproducts, highlighting the importance of validating alternative, environmentally friendly methods.

In this work, the degradation of the pollutants Bromothymol Blue, Acid Black 58, and Tartrazine was carried out using Homogeneous Oxidation Processes (O₃, UV, H₂O₂) in simple and combined systems. These processes are characterized by the generation rate of hydroxyl radicals ($\bullet$ OH), which have a high oxidation potential. A glass spiral reactor was used, with a lamp emitting ultraviolet radiation located in the central part. A 500 ml solution containing 10 mg/L of each contaminant (prepared separately) was introduced into a reservoir and recirculated using a peristaltic pump. The O₃ and H₂O₂ were injected into the reservoir.

The analysis of the residual liquid was performed using UV-visible spectrometry. In the case of the Bromothymol Blue dye, degradation efficiencies of up to 91% were obtained in the O₃/UV/1 ml H₂O₂ system, along with 100% decolorization efficiency. The results are attributed to kinetic mechanisms that promote $\bullet$ OH radicals and their collision with the dye, generating its oxidation. On the other hand, the results for Acid Black 58 were favorable, showing 88% degradation and 100% decolorization efficiency with the O₃/UV combination. Finally, the Tartrazine degradation process reached a degradation percentage of 62%. Unfortunately, in all cases, null or negative degradations were also observed.

Keywords: hydrogen peroxide, ozone, ultraviolet radiation, water.

ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	1
Justificación	3
Objetivo.....	4
<i>CAPÍTULO 1</i>.....	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
1.1 El agua	6
1.2 Importancia del agua.....	8
1.3 Contaminación del agua	8
1.4 Contaminantes generados por la industria alimenticia	9
1.5 Azul de bromotimol.....	10
1.5.1 Aplicación	11
1.5.2 Efectos nocivos para la salud humana	13
1.5.3 Efectos negativos a los efluentes del medio ambiente	14
1.6 Negro ácido 58	15
1.6.1 Aplicación	16
1.6.2 Efectos nocivos para la salud humana	16
1.6.3 Efectos negativos a los efluentes del medio ambiente	17
1.7 Tartrazina	17
1.7.1 Aplicación	18
1.7.2 Efectos nocivos para la salud humana	19
1.7.3 Efectos negativos a los efluentes del medio ambiente	20
<i>CAPÍTULO 2</i>.....	21
METODOLOGÍA	21
2.1 Descripción general del desarrollo experimental	22
2.2 Reactivos utilizados.....	23
2.3 Selección del método de tratamiento	25
2.4 Preparación de la solución sintética	25
2.5 Dispositivo experimental	26

2.6	Caracterización de la muestra.....	27
2.6.1	Análisis Cuantitativo:	27
2.6.2	Análisis cualitativo:	28
CAPÍTULO 3		31
RESULTADOS.....		31
3.1	Descripción general de resultados.....	32
3.2	Degradación de azul de bromotimol.....	32
3.2.1	Efecto de UV	32
3.2.2	Efecto de H ₂ O ₂	33
3.2.3	Efecto de O ₃	36
3.2.4	Efecto de UV/H ₂ O ₂	37
3.2.5	Efecto de O ₃ /H ₂ O ₂	40
3.2.6	Efecto de O ₃ /UV	43
3.2.7	Efecto de O ₃ /UV/H ₂ O ₂	44
3.3	Degradación de negro ácido 58	46
3.3.1	Efecto de UV	46
3.3.2	Efecto de H ₂ O ₂	47
3.3.3	Efecto de O ₃	51
3.3.4	Efecto de UV/ H ₂ O ₂	52
3.3.5	Efecto de O ₃ / H ₂ O ₂	56
3.3.6	Efecto de O ₃ / UV.....	59
3.3.7	Efecto de O ₃ / UV/ H ₂ O ₂	60
3.4	Degradación de tartrazina.....	63
3.4.1	Efecto de UV	63
3.4.2	Efecto de H ₂ O ₂	64
3.4.3	Efecto de O ₃	68
3.4.4	Efecto de UV/ H ₂ O ₂	69
3.4.5	Efecto de O ₃ / H ₂ O ₂	72
3.4.6	Efecto de O ₃ / UV.....	76
3.4.7	Efecto de O ₃ / UV/ H ₂ O ₂	77
.....		81
CAPÍTULO 4		81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		81

2	81
Conclusiones	82
Referencias	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Estructura molecular del agua	6
Figura 2	Ciclo del agua	7
Figura 3	Estructura molecular del azul de bromotimol.....	10
Figura 4	Estructura molecular del negro ácido 58	15
Figura 5	Estructura molecular Tartrazina.....	17
Figura 6	Descripción general del desarrollo experimental	22
Figura 7	Procesos de oxidación avanzada	25
Figura 8	Dispositivo experimental	26
Figura 9	Medidor de pH marca Hanna Instruments HI98103.....	28
Figura 10	Medidor de color marca Hanna Instruments HI727	28
Figura 11	Kit químico marca Hanna Instruments HI3818	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del azul de bromotimol	11
Tabla 2 Características del negro ácido 58	15
Tabla 3 Características de la tartrazina	18
Tabla 4 Descripción de los reactivos utilizados	23
Tabla 5 Resultados del análisis cualitativo de casos al azar con métodos de oxidación avanzada .	29
Tabla 6 Resultados del tratamiento UV	32
Tabla 7 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 1 ml.....	33
Tabla 8 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 1.5ml.....	34
Tabla 9 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 2 ml	35
Tabla 10 Resultados del tratamiento O ₃	36
Tabla 11 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 1 ml.....	37
Tabla 12 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 1.5 ml	38
Tabla 13 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 2 ml.....	39
Tabla 14 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 1 ml	40
Tabla 15 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 1.5 ml	41
Tabla 16 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 2 ml	42
Tabla 17 Resultados del tratamiento O ₃ /UV	43
Tabla 18 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/ H ₂ O ₂ a 1 ml	44
Tabla 19 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/ H ₂ O ₂ a 1.5 ml	45
Tabla 20 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/ H ₂ O ₂ a 2 ml	46
Tabla 21 Resultados del tratamiento UV.....	47
Tabla 22 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 1 mL	48
Tabla 23 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 1.5 mL	49
Tabla 24 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 2 mL	50
Tabla 25 Resultados del tratamiento O ₃	51
Tabla 26 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 1 mL.....	53
Tabla 27 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 1.5 mL.....	54
Tabla 28 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 2 mL	55
Tabla 29 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 1 mL.....	56
Tabla 30 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 1.5 mL	57
Tabla 31 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 2 mL.....	58
Tabla 32 Resultados del tratamiento O ₃ /UV	59
Tabla 33 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/ H ₂ O ₂ a 1 mL	60
Tabla 34 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/ H ₂ O ₂ a 1.5 mL	61
Tabla 35 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/ H ₂ O ₂ a 2 mL.....	62
Tabla 36 Resultados del tratamiento UV.....	63
Tabla 37 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 1 ml.....	65
Tabla 38 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 1.5 ml	66
Tabla 39 Resultados del tratamiento H ₂ O ₂ a 2 ml.....	67
Tabla 40 Resultados del tratamiento O ₃	68
Tabla 41 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 1 ml.....	69

Tabla 42 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 1.5 ml	70
Tabla 43 Resultados del tratamiento UV/H ₂ O ₂ a 2 ml.....	71
Tabla 44 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 1 ml	73
Tabla 45 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 1.5 ml	74
Tabla 46 Resultados del tratamiento O ₃ /H ₂ O ₂ a 2 ml	75
Tabla 47 Resultados del tratamiento O ₃ /UV	76
Tabla 48 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/H ₂ O ₂ a 1 ml	77
Tabla 49 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/H ₂ O ₂ a 1.5 ml	78
Tabla 50 Resultados del tratamiento O ₃ /UV/H ₂ O ₂ 2 ml	79

Introducción

El presente trabajo aborda uno de los desafíos ambientales más críticos del siglo XXI: la contaminación del agua por colorantes sintéticos. A medida que la población mundial crece y las industrias se expanden, el acceso a agua limpia y segura se vuelve un recurso más limitado.

En este contexto, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) se presentan como una herramienta de gran potencial. Estos procesos, que incluyen el uso de radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ozono (O_3), tienen la capacidad de generar radicales hidroxilos, los cuales poseen un potencial redox extremadamente alto. Este tipo de reacciones permite la oxidación y descomposición de compuestos orgánicos complejos en intermediarios de reacción menos tóxicos, con el objetivo de alcanzar la mineralización completa (conversión a CO_2 , H_2O y sales inorgánicas).

La validación de estos procesos no solo tiene implicaciones científicas y técnicas, sino que también puede transformar la manera en que las industrias gestionan sus efluentes. Una solución eficaz basada en los POA podría ser escalable, económica y adaptable a diferentes escenarios, lo que la convierte en una herramienta estratégica para enfrentar la crisis global del agua.

El propósito principal de este estudio es evaluar y optimizar el uso de métodos combinados de oxidación avanzada para la degradación del Azul de Bromotimol, Negro Ácido 58 y Tartrazina.

Este enfoque integral permitirá no solo validar la eficacia de los procesos propuestos, sino también explorar su aplicabilidad en la vida real, marcando un camino hacia soluciones más sostenibles y responsables.

El estudio de dicho trabajo se abordó en cuatro capítulos, donde en el Capítulo 1 Fundamentos Teóricos nos introducimos a los conceptos básicos como lo son el agua, contaminación del agua y sus afectaciones a la biodiversidad, los ecosistemas y los riesgos a la salud humana, también nos presentan los contaminantes de estudio del proyecto.

Al abordar un problema concreto como la contaminación por Este trabajo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, en particular con el objetivo 6: Agua limpia y saneamiento nos presentan los contaminantes de estudio que tendremos presentes durante todo el proyecto.

Por otro lado, el Capítulo 2 Metodología se describe todo lo que se empleó en este estudio se describe la combinación de un diseño experimental riguroso con herramientas de análisis avanzado. Para ello, se diseñó un reactor de vidrio en forma de espiral que incluye una lámpara UV de alta potencia y un sistema de recirculación, optimizado para maximizar el contacto entre los reactivos y la solución contaminada.

también de forma más puntual la preparación de las soluciones de los contaminantes que en este caso fueron soluciones sintéticas de todos los contaminantes a estudiar con una concentración estándar de 10 mg/L, simulando las condiciones encontradas en efluentes industriales. Estas soluciones fueron sometidas a diferentes configuraciones de tratamiento (UV, H₂O₂, O₃ y combinaciones de estos), evaluándose su eficacia en intervalos de tiempo predeterminados.

En el Capítulo 3 Resultados presentamos las respuestas obtenidas a partir del análisis de los POA realizados en cada uno de los contaminantes de estudio.

Finalmente, en el Capítulo 4 Conclusiones y Recomendaciones se exponen los resultados anteriores de manera particular y general, para el cierre se resaltan algunos consejos para la mejora del trabajo.

El desarrollo y validación de los procesos de tratamiento basados en los POA tiene el potencial de revolucionar las prácticas industriales, fomentando la adopción de tecnologías más limpias y responsables. Además, los hallazgos de este estudio podrían servir como base para implementar normativas más estrictas en la gestión de efluentes, promoviendo una mayor protección de los recursos hídricos.

Por último, este trabajo también destaca la importancia de la investigación científica en la construcción de un futuro más sostenible, donde las soluciones tecnológicas estén alineadas con el bienestar del planeta y sus habitantes.

Justificación

Los colorantes utilizados en la industria son cada vez más usados en cantidades masivas, sin embargo, su vertido en efluentes representa una problemática ambiental significativa debido a su resistencia a procesos de degradación natural y su potencial toxicidad para los ecosistemas acuáticos y organismos vivos.

Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales presentan limitaciones notorias para la eliminación de compuestos persistentes. Estas técnicas suelen ser ineficientes, requieren largos tiempos de procesamiento y generan subproductos que también pueden ser nocivos. En este contexto, se hace imprescindible explorar alternativas tecnológicas que ofrezcan una solución eficaz y sostenible.

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) surgen como una opción prometedora debido a su capacidad para generar radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), que poseen un alto poder oxidante capaz de descomponer contaminantes orgánicos complejos en compuestos más simples y menos tóxicos. Este enfoque no solo permite eliminar el colorante, sino también garantizar la mineralización de los contaminantes, reduciendo su impacto ambiental.

La relevancia de esta investigación radica en la necesidad urgente de desarrollar y validar métodos de tratamiento que sean escalables, económicos y respetuosos con el medio ambiente. La aplicación de combinaciones de POA, como el uso de ozono (O_3), radiación ultravioleta (UV) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ofrece una oportunidad única para optimizar la eficiencia de los tratamientos, minimizando los residuos tóxicos y protegiendo los recursos hídricos.

Al proponer soluciones tecnológicas innovadoras, esta investigación no sólo aborda un problema específico de contaminación, sino que también genera conocimientos aplicables a otros contextos industriales con desafíos similares.

En última instancia, esta investigación no solo busca validar la efectividad de los procesos propuestos, sino también sentar las bases para su implementación en la industria y fomentar prácticas más responsables en la gestión de los recursos hídricos.

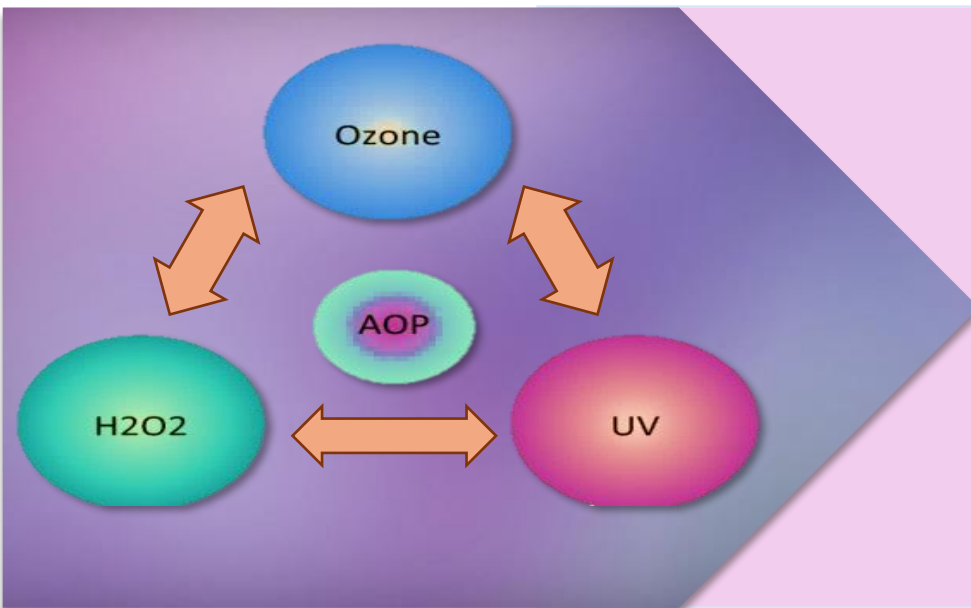
Objetivo

Objetivo general:

Evaluar y optimizar el uso de procesos combinados de oxidación avanzada (POA) para la degradación del Azul de Bromotimol, Negro Ácido 58 y Tartrazina en soluciones acuosas, analizando la efectividad en términos de decoloración, degradación química y generación de subproductos.

Objetivos específicos:

1. Determinar las condiciones óptimas de operación (como tiempo de tratamiento, concentración de reactivos y combinación de métodos) para maximizar la degradación del Azul de Bromotimol, Negro Ácido 58 y Tartrazina.
2. Analizar los cambios químicos y físicos en las muestras tratadas mediante técnicas como espectrofotometría UV-Vis, colorimetría y medición de pH.
3. Comparar la eficacia de diferentes configuraciones de POA, incluyendo UV, H₂O₂, O₃ y sus combinaciones.
4. Evaluar el impacto ambiental de los tratamientos propuestos mediante el análisis de subproductos generados durante los procesos de oxidación avanzada.



CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

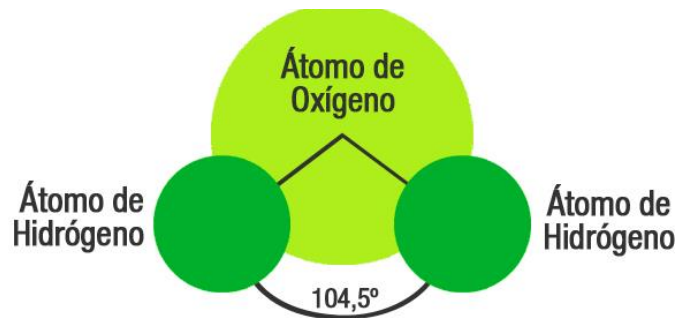
1.1 El agua

El agua se compone por la unión de dos átomos de hidrógeno (H) el cual tiene una carga positiva y uno de oxígeno (O) donde tenemos dos cargas negativas (*Figura 1*). El agua es una sustancia química esencial para la vida y la existencia en la Tierra. Su fórmula química, H_2O , indica que cada molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno unidos covalentemente a un átomo de oxígeno. Aunque parece sencilla, el agua tiene propiedades únicas que la convierten en el solvente universal y un componente clave en los procesos biológicos, químicos y físicos (Campbell & Reece, 2017).

- **Composición y Estructura**

Esto provoca una distribución desigual de la carga eléctrica, con el oxígeno presentando una ligera carga negativa y los hidrógenos una ligera carga positiva. Esta polaridad permite que las moléculas de agua formen enlaces de hidrógeno entre sí, contribuyendo a sus propiedades únicas como la alta cohesión, adhesión y tensión superficial (Boyer, 2012).

***Figura 1** Estructura molecular del agua*



- **Propiedades Físico-Químicas**

1. Estados de la Materia: El agua puede existir en los tres estados de la materia (sólido, líquido y gas) dentro de un rango de temperatura común en la Tierra. Cambia de estado mediante procesos como la fusión, evaporación y condensación, que son fundamentales para el ciclo hidrológico (Gonzalez, 2023).

2. Elevada Capacidad Calorífica: El agua puede absorber o liberar grandes cantidades de calor sin experimentar cambios drásticos en su temperatura, lo que regula el clima terrestre y protege los organismos de cambios térmicos bruscos (Campbell & Reece, 2017).
3. Solvente Universal: Su polaridad le permite disolver una amplia variedad de sustancias, facilitando reacciones químicas esenciales para la vida, como las que ocurren en el metabolismo celular (Dawson et al., 1986).

- **Importancia Biológica**

El agua representa entre el 60 % y el 70 % del peso corporal en los organismos vivos y es crucial para procesos como:

- Fotosíntesis: Sirve como reactivo en la fotosíntesis, permitiendo la producción de glucosa y oxígeno en plantas (Campbell & Reece, 2017).
- Transporte: En animales, transporta nutrientes, desechos y gases a través del sistema circulatorio (Boyer, 2012).
- Regulación Térmica: En humanos, la evaporación del sudor ayuda a disipar el exceso de calor (APHA, 2017).

- **Ciclo del Agua**

El ciclo del agua describe su movimiento continuo entre la atmósfera, la superficie terrestre y los cuerpos de agua. Es esencial para mantener el equilibrio del planeta y soportar ecosistemas.

Figura 2 *Ciclo del agua*



1.2 Importancia del agua

El agua es fundamental para nuestra existencia en el planeta tierra. Según López (2016):

A lo largo de la historia, el agua ha jugado un papel fundamental. Todas las sociedades han necesitado asentarse siempre cercanas a este valioso recurso para asegurar y mantener la supervivencia de su población. (p. 9).

Debido a que este sirve como base para la realización de diferentes actividades como lo son la agricultura, ganadería, pesca, etc. Siendo esto la base para la realización e impulso de nuestro estilo de vida actual tomando en cuenta que el agua siempre ha sido considerada como materia prima para cualquier actividad. López (2016) nos plantea que desde la antigua civilización egipcia siendo el río Nilo esencial para estos, el antiguo imperio romano con la ciudad de roma, también llamada “la ciudad del agua”.

Papel en los Ecosistemas:

- El agua es fundamental para mantener el equilibrio tanto de ecosistemas como de la vida. Ríos, lagos, mares y aguas subterráneas actúan como hábitats para una enorme diversidad de especies. Además:
- Ciclo del Nutriente: Ayuda a movilizar nutrientes esenciales, como el nitrógeno y el fósforo, en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Gleick, 1996).
- Mantenimiento del Clima: Los cuerpos de agua almacenan calor y contribuyen a la regulación climática global mediante la evaporación y la precipitación (UNESCO, 2020).

1.3 Contaminación del agua

La contaminación del agua es uno de los principales problemas que enfrenta la humanidad esto se genera al introducir sustancias nocivas ajenas al agua las cuales son generadas por el mal manejo de residuos, desechos sólidos y líquidos, plásticos, desechos fecales, fármacos, pesticidas, etc. Todo esto degrada la calidad del agua provocando un desequilibrio en la vida por la transmisión de enfermedades y problemas ambientales (calentamiento global, sequías, entre otros). “Actualmente el ritmo al que el ser humano contamina el agua supera con creces el ritmo de depuración natural, que se produce por el curso continuado del agua a través de

las diferentes fases de su ciclo” (López 2016, p. 12). Tomando esto en cuenta la contaminación del agua a alcanzado un punto crítico.

- **Fuentes de Contaminación del Agua**

Existen diversas fuentes que contribuyen a la contaminación del agua, entre las cuales destacan:

- Fuentes Puntuales: I ser específicas y localizables pueden monitorearse y regularse fácilmente y de manera constante, correspondiendo a descargas directas de contaminantes, como los vertidos industriales, las descargas de aguas residuales tratadas o no tratadas y los derrames accidentales de sustancias químicas (Galaviz Villa & Sosa Villalobos, 2019).
- Fuentes Difusas: Aportes indirectos provenientes de actividades agrícolas, como el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas que llegan a los ríos y lagos a través de la escorrentía (López & Fernández, 2020).

1.4 Contaminantes generados por la industria alimenticia

La industria alimenticia es una de las más importantes a nivel mundial, ya que satisface las necesidades básicas de la población. Sin embargo, también es responsable de generar diversos contaminantes que afectan el medio ambiente y la salud pública. Estos contaminantes incluyen residuos sólidos, aguas residuales, emisiones atmosféricas y desechos químicos, los cuales requieren una gestión adecuada para minimizar su impacto (Rodríguez & Pérez, 2020).

- **Principales Contaminantes Generados**

1.- Aguas Residuales: La industria alimenticia utiliza grandes volúmenes de agua en sus procesos, lo que genera aguas residuales cargadas de materia orgánica, grasas, aceites y productos químicos como detergentes y desinfectantes. Estas aguas contaminadas, si no se tratan adecuadamente, pueden afectar los ecosistemas acuáticos (Gómez et al., 2019).

2.- Residuos Sólidos:

- **Desechos Orgánicos:** Restos de alimentos, cáscaras, huesos y otros materiales orgánicos que pueden descomponerse y liberar gases de efecto invernadero como el metano (Rodríguez & Pérez, 2020).
- **Envases y Embalajes:** El uso excesivo de plásticos y materiales no biodegradables genera un alto volumen de residuos sólidos que contribuyen a la contaminación terrestre y marina (López et al., 2021).

3.- Emisiones Atmosféricas: Durante la producción y procesamiento de alimentos, se emiten gases contaminantes como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles, los cuales contribuyen al cambio climático (Pérez & Fernández, 2022).

4.- Contaminantes Químicos:

- Uso de pesticidas y fertilizantes en cultivos destinados a la industria alimenticia.

Vertidos de sustancias químicas durante el procesamiento, como amoníaco y cloro, que pueden contaminar el suelo y el agua (Gómez et al., 2019).

1.5 Azul de bromotimol

El azul de bromotimol es un indicador de pH que se usa para medir la acidez o basicidad de una solución con una composición de C₂₇H₂₈Br₂O₂S. Es un colorante que se puede encontrar en forma de sólido y que se vende como sal de sodio. Esta presenta un color amarillo en solución ácida con la característica que en solución básica presenta un color azul y en solución neutra un color verde (Lifeder, 2022).

Figura 3 Estructura molecular del azul de bromotimol

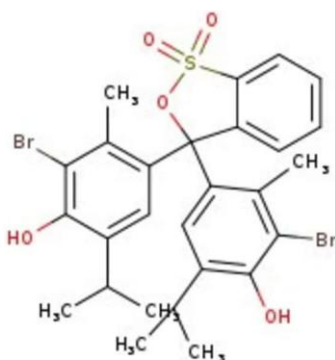


Tabla 1 Características del azul de bromotimol

Nombre Químico	Azul de bromotimol o 3,3'-dibromotimolsulfonaftaleína.
Formula molecular	$C_{27}H_{28}Br_2O_2S$
Peso molecular	624.384 g/mol
Aspecto físico	Polvo sólido de color que oscila entre rosado y púrpura.
Constante de disociación iónica (K_a)	7.9×10^{-8}
Gama de indicación activa	pH 6.0 a 7.6
Densidad	1.25 g/cm ³
Punto de fusión	202 °C (396 ° F)
Punto de ebullición	184.9 °C
Solubilidad	Es escasamente soluble en agua y aceite.

1.5.1 Aplicación

- **Medición del pH de piscinas y acuarios**

Presenta una escala de indicación activa comprendida entre un pH 6.0 y de 7.6 a un pH del medio menor a 6.5 manifiesta una coloración amarilla. cuando el pH del medio varía entre 6.5 y 7.6, adquiere una coloración verde, a pH mayores a 7.6 su color es azul (American Public Health Association [APHA], 2017).

- **Control de desinfectantes**

El pH influye directamente en la eficacia de desinfectantes como el cloro, ya que su forma activa (ácido hipocloroso) predomina en un rango específico de pH (5.5-7.5). El BBT ayuda a verificar que el pH esté en el rango adecuado para maximizar la efectividad del desinfectante (APHA, 2017).

- **Tratamiento de agua potable, residual y cruda**

El BBT se emplea para monitorear el pH durante procesos como la coagulación, floculación y neutralización, ya que estos procesos requieren valores específicos de pH para ser efectivos. El cambio de color facilita una lectura rápida durante el tratamiento (Boyer, 2012).

- **Detección de la ruptura prematura de membranas en obstetricia**

El líquido amniótico tiene un pH mayor (7.1-7.3) en comparación con las secreciones vaginales normales (4.5-6.0). Al aplicar BBT, un cambio de color a azul puede indicar la presencia de líquido amniótico y, por ende, una posible ruptura prematura de membranas (Mittal, 2020).

- **Observación de actividades fotosintéticas**

El BBT se usa para detectar cambios en la concentración de dióxido de carbono, que influye en el pH del medio. En experimentos, el cambio de color del BBT indica si las plantas están absorbiendo CO₂ (pH sube, color azul) o liberándolo (pH baja, color amarillo), lo que refleja la actividad fotosintética (Campbell y Reece, 2017).

- **Indicador respiratorio**

En experimentos de respiración celular, se usa BBT para observar la producción de dióxido de carbono. Cuando el CO₂ se disuelve en agua, forma ácido carbónico, que disminuye el pH. Un cambio a amarillo indica mayor concentración de CO₂ y, por lo tanto, actividad respiratoria (Dawson, 1986).

- **Definición de paredes celulares o núcleos bajo el microscopio**

El BBT no es un tinte habitual para teñir paredes celulares o núcleos, pero puede usarse como un indicador de pH en experimentos donde se estudie la actividad metabólica celular. Por ejemplo, si las células están produciendo ácido o consumiendo CO₂, esto cambia el color del medio (Ahluwalia y Aggarwal, 2005).

- **Detección de la presencia de ácido carbónico en un líquido**

El ácido carbónico, formado al disolver dióxido de carbono en agua, baja el pH del líquido. El BBT puede detectar este cambio mostrando un color amarillo si el pH desciende por debajo de 6.0, indicando la presencia de ácido carbónico en el medio (Ahluwalia y Aggarwal, 2005).

1.5.2 Efectos nocivos para la salud humana

Aunque el azul de bromotimol es generalmente considerado no tóxico en concentraciones bajas, se han reportado efectos adversos derivados de su exposición en niveles más altos o prolongados. A continuación, se exploran los principales riesgos asociados con esta sustancia:

- **Toxicidad dérmica y ocular**

La exposición directa al azul de bromotimol puede provocar irritaciones en la piel y los ojos. Los síntomas pueden incluir enrojecimiento, ardor, y sensación de picazón. En casos más graves, la sustancia puede causar daños a los tejidos si no se remueve adecuadamente (European Chemicals Agency [ECHA], 2017).

- **Toxicidad por inhalación**

La inhalación de los vapores de azul de bromotimol puede ser peligrosa para las vías respiratorias, especialmente si se realizan procedimientos que generen polvo o aerosoles. La exposición prolongada o en grandes cantidades puede irritar las mucosas nasales y la garganta, causando tos, dificultad para respirar y otras molestias respiratorias (National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 2019).

- **Toxicidad por ingestión**

Si se ingiere azul de bromotimol, puede causar efectos adversos como náuseas, vómitos y malestar estomacal. En casos extremos, puede llegar a provocar efectos más severos sobre el sistema digestivo, aunque se considera que la toxicidad por ingestión es baja en concentraciones típicas (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2001).

- **Efectos a largo plazo y carcinogenicidad**

Aunque no se han establecido pruebas definitivas que sugieran que el azul de bromotimol es carcinógeno, se recomienda evitar exposiciones prolongadas o repetidas debido a la posibilidad de efectos acumulativos. Los estudios sobre su carcinogenicidad son limitados y, por lo tanto, no hay consenso en la comunidad científica sobre este tema (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2007).

- **Riesgo para el medio ambiente**

El azul de bromotimol, si se libera en grandes cantidades al medio ambiente, podría tener efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, el impacto ambiental es generalmente bajo si se maneja adecuadamente (European Chemicals Agency [ECHA], 2017).

1.5.3 Efectos negativos a los efluentes del medio ambiente

El impacto ambiental del azul de bromotimol es una preocupación creciente, especialmente cuando se libera en grandes cantidades en los cuerpos de agua. Los efluentes que contienen este compuesto pueden tener los siguientes efectos sobre los ecosistemas acuáticos:

- **Toxicidad acuática**

El azul de bromotimol, si se derrama o es liberado en el agua, puede alterar la calidad del agua. Aunque se ha estudiado poco su toxicidad específica en organismos acuáticos, los compuestos similares que contienen bromo o sulfonatos pueden afectar la biodiversidad acuática al interferir con el metabolismo de los organismos y alterar los ciclos biológicos (European Chemicals Agency [ECHA], 2017).

- **Interferencia con el ciclo del oxígeno**

El cambio en la concentración de iones en el agua, provocado por la presencia de compuestos como el azul de bromotimol, podría afectar la solubilidad del oxígeno, lo que afectaría negativamente a las especies acuáticas que dependen de niveles estables de oxígeno para su supervivencia.

- **Bioacumulación**

Los efectos de la bioacumulación en organismos acuáticos aún no se han estudiado exhaustivamente en relación con el azul de bromotimol. Sin embargo, algunos compuestos que contienen bromuro y grupos sulfonatos tienen el potencial de acumularse en la cadena alimentaria, lo que podría generar problemas a largo plazo para los ecosistemas (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2007).

- **Riesgos para la fauna y flora acuáticas**

La liberación de residuos que contienen azul de bromotimol en cuerpos de agua podría provocar un deterioro en la salud de los organismos acuáticos, desde la flora hasta los peces, afectando la biodiversidad local y el equilibrio ecológico.

1.6 Negro ácido 58

Los colorantes comerciales, incluyendo el negro, se usan en una amplia gama de productos como alimentos, cosméticos, productos farmacéuticos y textiles. Aunque pueden ser útiles para mejorar la apariencia, el atractivo visual y la vida útil de los productos, varios estudios científicos han demostrado que algunos de estos compuestos tienen efectos negativos para la salud humana y el medio ambiente (Tabarez De León, 2018).

Figura 4 Estructura molecular del negro ácido 58

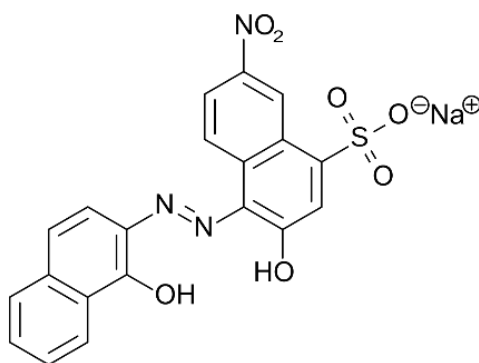


Tabla 2 Características del negro ácido 58

Nombre Químico	Negro Ácido 58
Formula molecular	C ₄₀ H ₃₅ CrN ₆ O ₁₂ S ₂
Peso molecular	974.88 g/mol
Aspecto físico	Polvo o gránulos sólidos de color negro
Gama de indicación activa	pH 2.0 a 5.0
Densidad	-----
Punto de fusión	-----
Punto de ebullición	-----
Solubilidad	Es altamente soluble en agua fría y caliente.

1.6.1 Aplicación

- Alimentos

Los colorantes alimentarios, como los negros sintéticos (por ejemplo, el Negro Brillante BN o E151), se utilizan para dar color a bebidas, dulces, pasteles, salsas y otros alimentos procesados. Aunque se valoran por su estabilidad y bajo costo (Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO,2020).

- Cosméticos

En cosméticos, los colorantes negros se emplean en productos como máscaras de pestañas, delineadores, lápices labiales y tintes capilares. Su uso en la industria cosmética está regulado por normativas sanitarias, aunque algunos de ellos pueden liberar compuestos tóxicos al descomponerse (PROFECO, 2020).

- Textiles

Los colorantes negros son esenciales en la industria textil para teñir fibras como algodón, poliéster y nylon. También se utilizan en plásticos, tintas y pinturas. Sin embargo, su producción y aplicación generan efluentes altamente contaminantes (Zamura et al, 2018).

1.6.2 Efectos nocivos para la salud humana

- Alérgicos y reacciones adversas

Algunos colorantes sintéticos, como el Negro Brillante BN (E151), ha sido asociados con reacciones como asma, urticaria, eczemas y reacciones anafilácticas en personas sensibles (AEPNAA, 2019).

- Enfermedades inflamatorias intestinales (EII)

Investigaciones en modelos animales han demostrado que el consumo prolongado de ciertos colorantes alimentarios puede generar una disrupción la barrera intestinal y promover el desarrollo de inflamaciones crónicas como la colitis (Škrabáková, 2015).

- Posible vínculo con el cáncer

Algunos colorantes azoicos, como el Negro Brillante BN, pueden degradarse en el organismo y liberar aminas aromáticas que son compuestos potencialmente cancerígenos (Škrabáková, 2015).

1.6.3 Efectos negativos a los efluentes del medio ambiente

- Contaminación del agua

Los efluentes provenientes de industrias que usan colorantes contienen residuos tóxicos difíciles de eliminar en los procesos convencionales de tratamiento de aguas. Estos colorantes alteran el color natural de las aguas, interfieren con la fotosíntesis acuática y deterioran la calidad del agua potable (Ziolo et al, 2016).

- Toxicidad

Se ha comprobado que algunos colorantes negros afectan la reproducción, crecimiento y comportamiento de peces, algas y microorganismos acuáticos. Incluso concentraciones bajas pueden resultar letales para ciertas especies sensibles (Ziolo et al, 2016).

- Resistencia a la degradación

Muchos colorantes sintéticos tienen una estructura química compleja y estable, lo que los hace resistentes a procesos naturales de degradación, acumulándose en cuerpos de agua y sedimentos durante largos períodos (D.H.D, 2004).

1.7 Tartrazina

La tartrazina es un colorante que proviene de la familia de los colorantes azoicos, su composición química es $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$ es utilizado mayormente en la industria alimenticia, se puede encontrar en estado sólido en forma de polvo brillante.

Figura 5 Estructura molecular Tartrazina

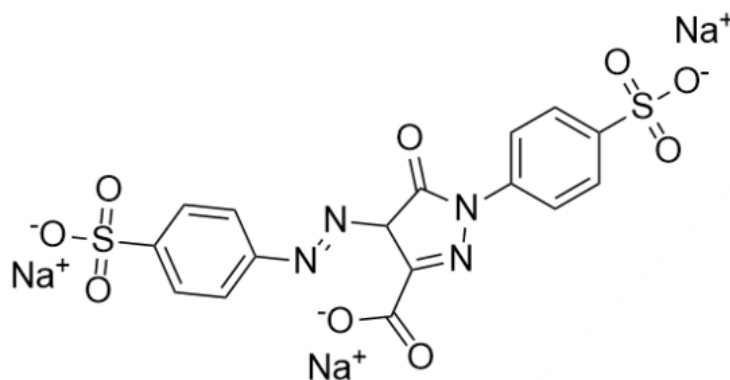


Tabla 3 Características de la tartrazina

Nombre Químico	Tartrazina E-102
Formula molecular	$C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$
Peso molecular	534.385 g/mol
Aspecto físico	Polvo o gránulos sólidos de color amarillo – naranja.
Gama de indicación activa	pH 4.0 a 8.5
Densidad	1.9 g/cm ³
Punto de fusión	>300° C
Punto de ebullición	300 °C
Solubilidad	Es altamente soluble en agua fría y caliente

1.7.1 Aplicación

- Uso en alimentos

Es ampliamente utilizado en la industria alimenticia como un colorante principal para el proceso de los siguientes alimentos; fabricación de galletas, sopas preparadas, encurtidos enlatados, conservas vegetales, bebidas que contengan color “limón”, entre otros (Arrieta, 2022).

- Uso en la industria

La tartrazina a un que es utilizada mayormente en la industria alimenticia, igual abacá otras ramas, como lo son los colorantes en jabón, cosméticos, cremas, textiles, detergentes y productos de uso farmacéutico (Rojas, 2008).

1.7.2 Efectos nocivos para la salud humana

- Trastorno de Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH)

Un estudio de 2008 en Reino Unido demostró que mezclas con tartrazina y otros aditivos aumentaron la hiperactividad en niños de 3 a 9 años.

Otros estudios (1990 y 1997) asociaron el consumo de tartrazina con disminución de zinc y aumento de hiperactividad. También se sugirió que puede liberar histaminas, lo cual afecta el sistema inmunológico (Archives of Disease in Childhood, 00202008)).

- Enfermedades en la sangre

Un estudio en ratas (2012) mostró que colorantes como la tartrazina disminuyen el peso corporal, glóbulos rojos y hemoglobina, además de afectar hígado y riñones (Fathy, H. E.-D. M., 2012).

- Mucosa gástrica

En ratas, dosis elevadas de tartrazina dañaron la mucosa gástrica.

Al suspenderla, los daños se redujeron, y la recuperación fue mejor con riboflavina (vitamina B2) (Walaa, M., & Mohamed, A., 2019).

- Efectos Genotóxicos

El estudio de Khayyat (2017) analizó el impacto de la tartrazina en el hígado, riñón y ADN de ratas Wistar. Se observó daño en el ADN de los glóbulos blancos mediante el ensayo del cometa, así como alteraciones celulares e histopatológicas en hígado y riñón, y un aumento en marcadores de daño hepático, renal y estrés oxidativo. Se concluyó que la tartrazina puede causar efectos adversos, principalmente daño en el ADN (El estudio de Khayyat, 2017).

- Efectos Embriotóxicos y Teratogénicos

Mohamed H. (2019) encontró que la tartrazina administrada durante la gestación causó reabsorciones fetales, mortalidad fetal, bajo peso y longitud fetal, malformaciones viscerales, esqueléticas y hepáticas. Se concluyó que tiene efectos embriotóxicos y teratogénicos en ratas.

- Efectos Neuronales

Varios estudios (Matayoshi S., Rafati A., Diksha B., Gadah A.) mostraron que la tartrazina afecta negativamente el cerebro y la función cognitiva en ratas:

Matayoshi (2017): En ratas de segunda generación, se observó disminución de GSH, aumento de lipoperoxidación, daño histológico cerebral y deterioro cognitivo.

Rafati (2017): La tartrazina causó pérdida neuronal, reducción de volumen y dendritas en la corteza prefrontal. La vitamina E contrarrestó estos efectos.

- Cambios Fisiológicos y Bioquímicos

Sayema A. (2017): Dosis altas de tartrazina redujeron el aumento de peso corporal y alteraron significativamente el peso y funcionamiento de órganos como corazón, riñón e hígado, con cambios en triglicéridos, colesterol y bilirrubina.

Madeha A. (2018): El aceite de *Nigella sativa* contrarrestó los efectos adversos de la tartrazina en ratas macho, restaurando parámetros bioquímicos y tejidos afectados.

1.7.3 Efectos negativos a los efluentes del medio ambiente

- Daños al medio ambiente

La preocupación ambiental respecto a la tartrazina radica en su uso masivo y su alta estabilidad química, que impiden su fácil degradación una vez liberada al ambiente. Esto genera impactos ecológicos que afectan tanto a la biodiversidad acuática como a la calidad del agua y los suelos (Saltos et la, 2019).

- Contaminación de cuerpos de agua

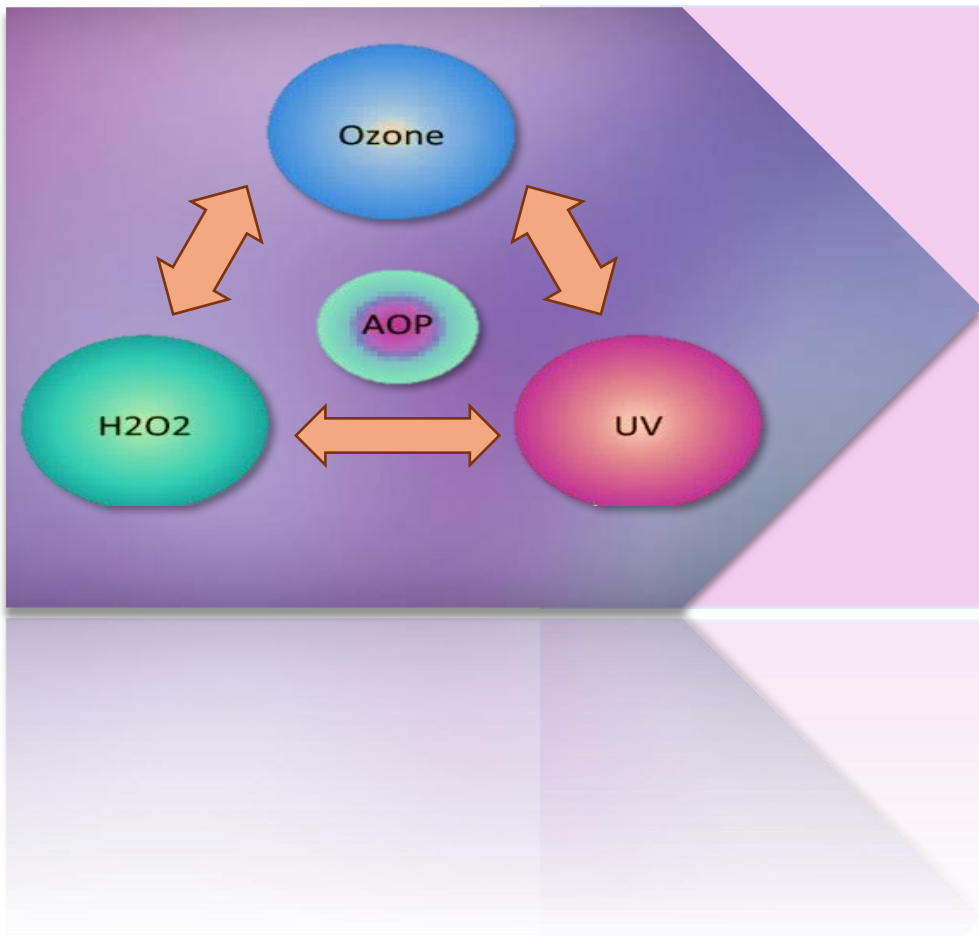
Las industrias alimentarias, textiles y farmacéuticas que utilizan colorantes como la tartrazina suelen verter residuos líquidos con trazas de este compuesto a ríos, lagos y canales. Debido a su solubilidad en agua y resistencia a la biodegradación, la tartrazina puede persistir durante meses.

Este fenómeno provoca el enturbiamiento del agua, lo que impide el paso de la luz solar a niveles profundos, afectando la fotosíntesis de organismos acuáticos como algas y plantas sumergidas. Esto, a su vez, interrumpe la cadena trófica y reduce los niveles de oxígeno disuelto (Saltos et la, 2019).

- Resistencia al tratamiento de aguas residuales

Uno de los mayores desafíos asociados con los colorantes azoicos como la tartrazina es su resistencia a los procesos tradicionales de tratamiento de aguas residuales. Métodos como la sedimentación, filtrado y cloración tienen una eficacia limitada.

Se requieren tratamientos avanzados como la fotocatalisis, ozonización o el uso de bacterias especializadas para degradar estos compuestos, lo cual incrementa los costos operativos y técnicos de las plantas de tratamiento (Saltos et la, 2019).



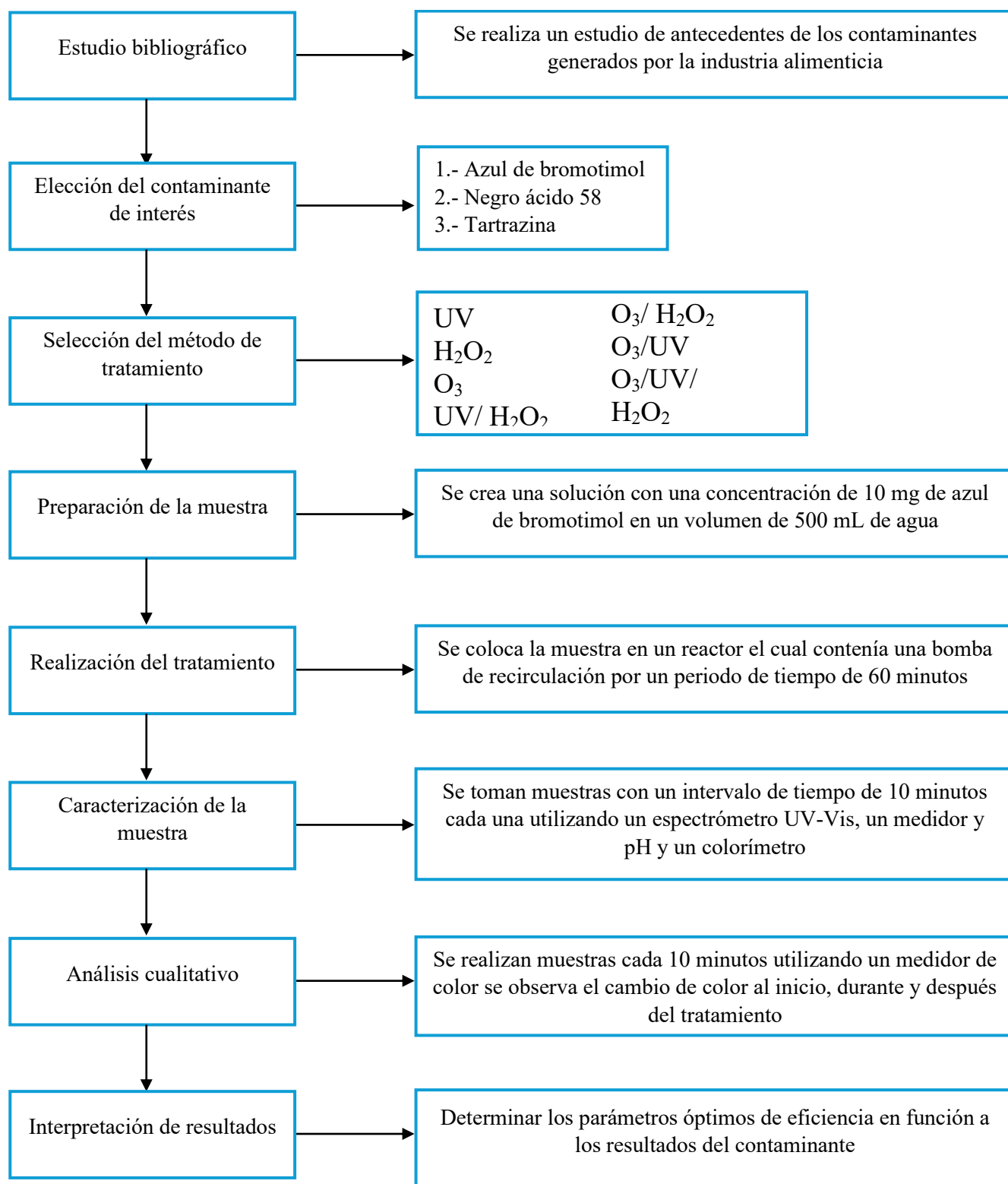
CAPÍTULO 2

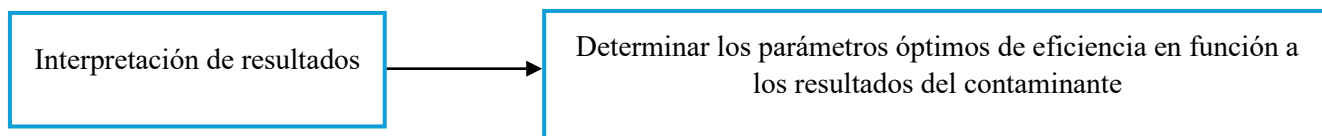
METODOLOGÍA

2.1 Descripción general del desarrollo experimental

En la *Figura 6* se describe un diagrama global del desarrollo experimental para la degradación del contaminante azul de bromotimol.

Figura 6 Descripción general del desarrollo experimental





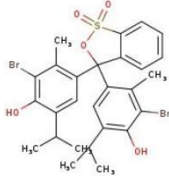
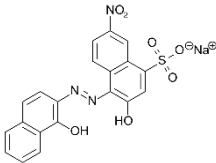
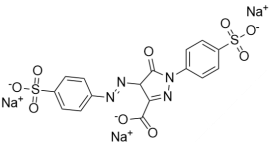
En este capítulo se aborda el desarrollo experimental que se utilizó durante la realización del proyecto este consiste en el análisis de los diferentes Procesos de Oxidación Avanzada (UV, H₂O₂, O₃, UV/ H₂O₂, O₃/ H₂O₂, O₃/UV y O₃/UV/ H₂O₂) se incluyó un reactor en forma de espiral donde se implementó una bomba para realizar una recirculación.

Se hizo una solución con 10 mg de azul de bromotimol en un volumen de 500 mL y se realizó un análisis de forma cuantitativa que en el caso de su caracterización se realizó con el equipo de UV-Vis, un medidor de pH y un colorímetro donde se tomaron muestras cada 10 minutos durante un periodo de 60 minutos y de forma cualitativa se fue observando el cambio de color del contaminante en función al tiempo.

2.2 Reactivos utilizados

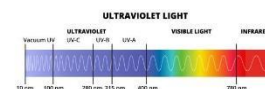
Los reactivos y sustancias utilizados en el proyecto se pueden visualizar en la *Tabla 4*.

Tabla 4 Descripción de los reactivos utilizados

Reactivo o sustancia	Descripción	Estructura molecular
Azul de bromotimol	Es un indicador de pH el cual mide la acidez de una solución con una composición de C ₂₇ H ₂₈ Br ₂ O ₂ S.	
Negro ácido 58	Este se puede encontrar agregado en la composición de varios productos como lo son; alimentos, cosméticos, textiles, etc.	
Tartrazina	Es un colorante azoico, su estado es sólido y lo podemos encontrar en forma de polvo brillante la composición química es C ₁₆ H ₉ N ₄ Na ₃ O ₉ S ₂ usualmente lo encontramos en productos alimenticios.	

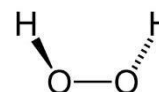
UV

Los rayos ultravioletas (UV) son una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda más cortas que la luz visible pero más largas que los rayos X, situándose entre 100 y 400 nanómetros (nm).



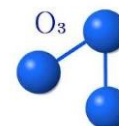
H₂O₂

El peróxido de hidrógeno (H₂O₂), conocido comúnmente como agua oxigenada, es un compuesto químico formado por dos átomos de hidrógeno y dos de oxígeno.



O₃

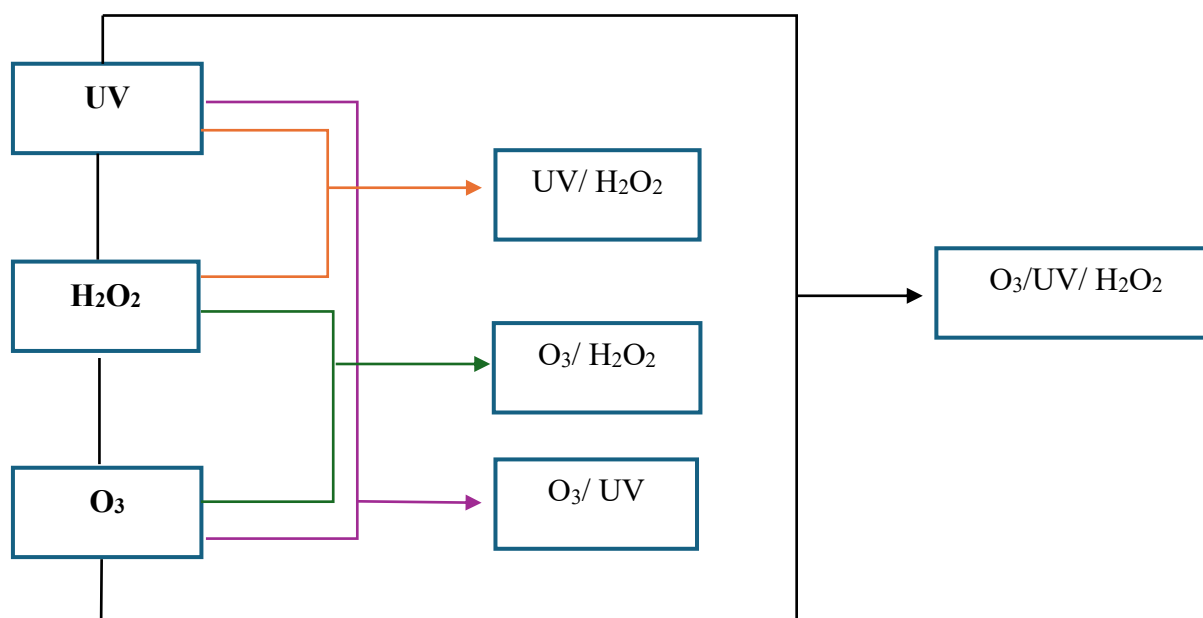
El ozono (O₃) es una molécula triatómica compuesta por tres átomos de oxígeno, conocida por su papel esencial tanto en la protección como en el impacto ambiental. En la atmósfera, el ozono se encuentra principalmente en dos capas: la estratosfera y la troposfera.



2.3 Selección del método de tratamiento

Para efectuar la degradación de los colorantes se realizaron diversos procesos de oxidación avanzada como se muestra en la *Figura 7*.

Figura 7 Procesos de oxidación avanzada



2.4 Preparación de la solución sintética

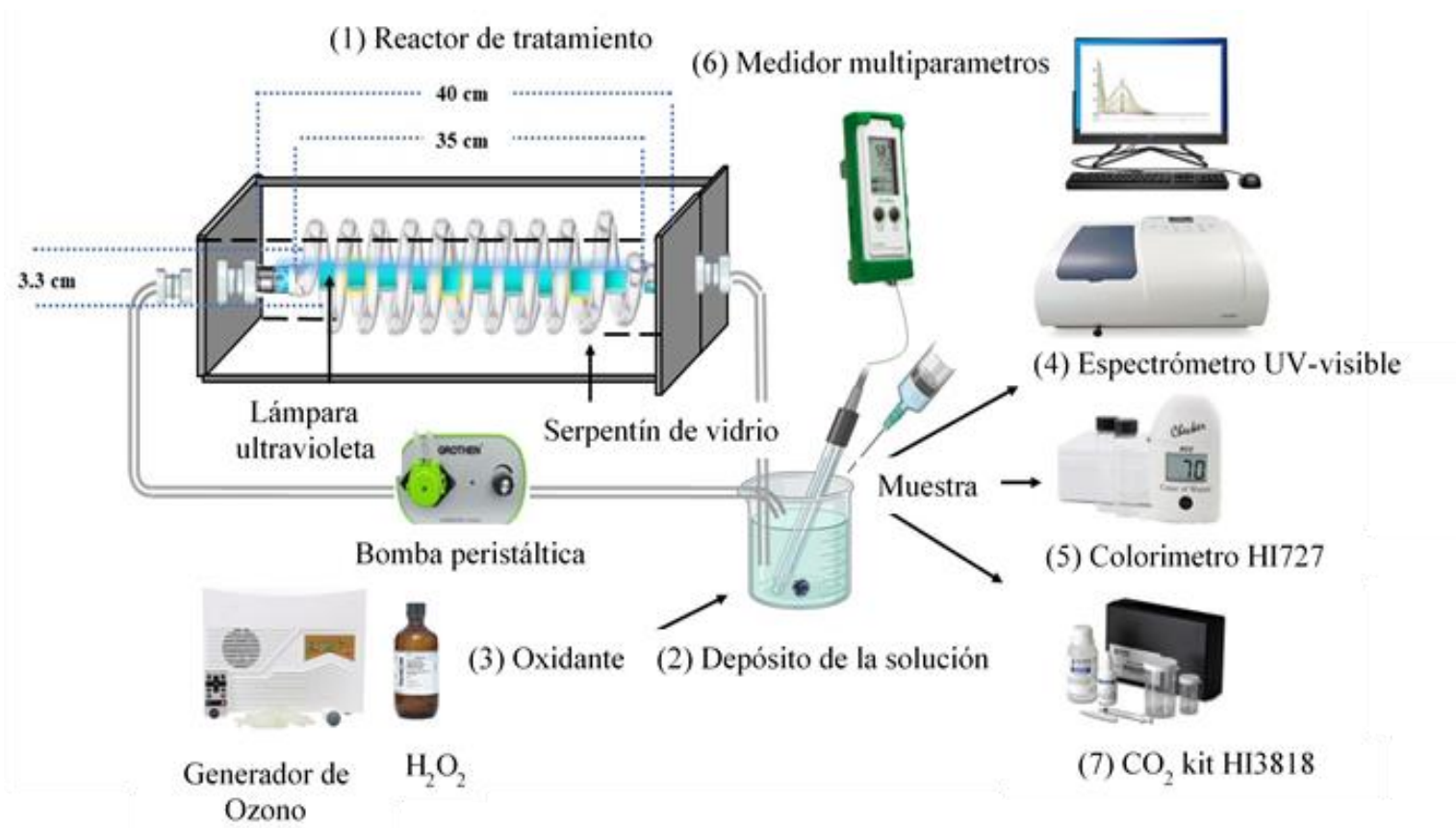
Para realizar la preparación de la solución sintética del colorante se pesó en la balanza analítica 10 mg de azul de bromotimol este se disolverá en un volumen inicial de 500 mL, dicha solución se mantuvo en agitación magnética (10 min) para asegurar su completa disolución y homogeneización para esto se utiliza un agitador magnético.

2.5 Dispositivo experimental

El dispositivo experimental que se utilizó para realizar los POA fue un reactor de vidrio en forma de espiral (1) para una mayor estabilidad se colocó en una caja de confinamiento hecha con un revestimiento interno de aluminio para maximizar la reflectancia de la radiación UV en el centro se ubicó una lámpara de luz UV con una capacidad de 11 W, de igual forma se implementó una bomba para generar una recirculación, además se incorporó una piedra difusora en el depósito de la solución (2) para poder inyectar el ozono y en algunos casos oxidante (3).

Para la recolección de las muestras se utilizó una jeringa de 3 ml, posteriormente se colocará la muestra en el espectrómetro UV-Visible (4) y determinar su máxima longitud de onda, con ayuda de un medidor multiparámetros (6) tomamos el valor del pH del contaminante, después se utilizó un colorímetro (5) para determinar la eficiencia de degradación de forma cualitativa por último se realizó una medición de CO₂ con el kit H I3818 (7).

Figura 8 Dispositivo experimental



2.6 Caracterización de la muestra

2.6.1 Análisis Cuantitativo:

- Determinación del porcentaje de degradación

Para determinar el porcentaje de degradación se utilizó la fórmula 1 la cual se muestra a continuación

$$\% \text{ degradación} = \frac{C_{inicial} - C_{tiempo}}{C_{inicial}} \times 100$$

(Formula 1)

Donde:

$C_{inicial}$ = Es la concentración al inicio del tratamiento

C_{tiempo} = Es la concentración en función al tiempo de tratamiento

- Determinación de energía eléctrica consumida (Cálculo del **mérito eléctrico (EEO)**)

$$E_{EO} = \frac{P_{elec} \cdot t \cdot 1000}{V \times 60 \cdot \log(C_0/C_t)}$$

Donde:

E_{EO} = Energía eléctrica consumida (kWh)

P_{elec} = Es la potencia suministrada (kW)

T = Tiempo del tratamiento (min)

V = Volumen (L)

C_0 = Concentración inicial del tratamiento

C_t = Concentración final al tiempo del tratamiento

100 y 60 son factores de conversión

2.6.2 Análisis cualitativo:

- Determinación de pH

En cada tratamiento se realizó un análisis de pH, este se considera desde el inicio del tratamiento (0 minutos) hasta el final del tratamiento (60 minutos) tomando muestras cada 10 minutos, para esto se utilizó un medidor de pH de la marca Hanna Instruments HI98103 (*Figura 9*).

Figura 9 Medidor de pH marca Hanna Instruments HI98103



- Determinación del color

Al inicio de cada tratamiento se tomó una muestra de 10 ml, al igual que en la medición de pH se tomaron muestras al inicio del tratamiento (0 minutos) y hasta el final del tratamiento (60 minutos) este proceso se repitió con intervalos de 10 minutos, el equipo utilizado en este proceso fue un colorímetro de Hanna Instruments HI727 (*Figura 10*).

Figura 10 Medidor de color marca Hanna Instruments HI727



- Determinación de CO₂

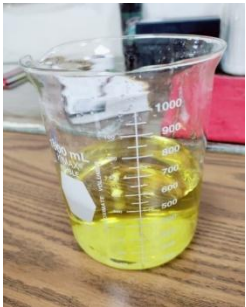
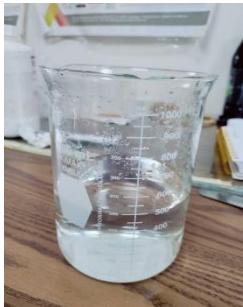
Al final de cada tratamiento las soluciones se expusieron a una medición de CO₂, donde se adiciono fenolftaleína y se tituló utilizando un kit químico de Hanna Instruments HI3818 (Figura 11).

Figura 11 Kit químico marca Hanna Instruments HI3818



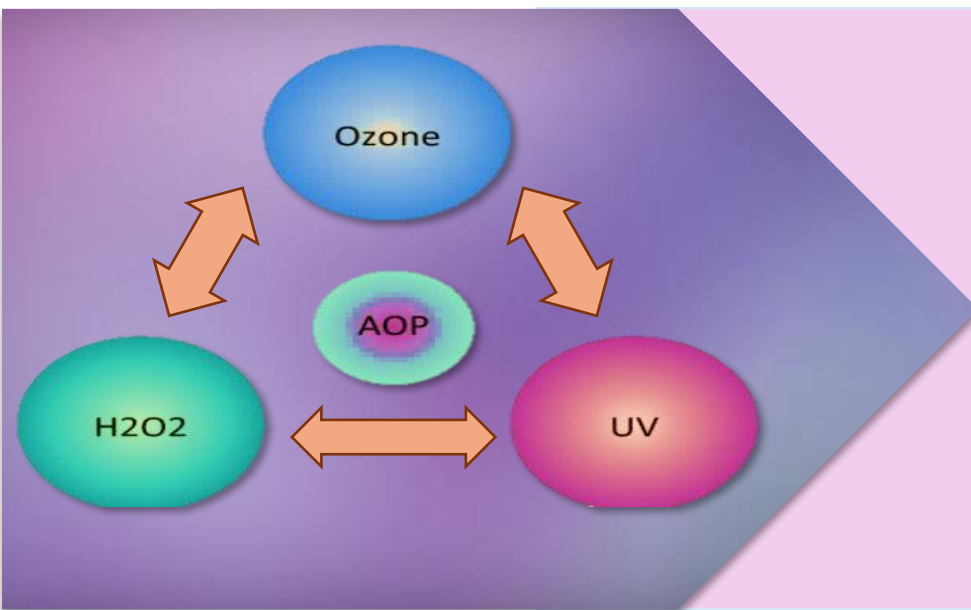
A continuación, en la Tabla 5 se observan algunos casos al azar del cambio de los contaminantes utilizando los métodos de oxidación avanzada.

Tabla 5 Resultados del análisis cualitativo de casos al azar con métodos de oxidación avanzada

Tipo de contaminante	Inicio del tratamiento	Final del tratamiento
Azul de brotimol		
Negro ácido 58		

Tartrazina





CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Descripción general de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la degradación de los colorantes de estudio, específicamente azul de bromotimol, tartrazina y negro ácido 58 aplicando diversos Procesos de Oxidación Avanzada, los cuales, para una mayor organización serán presentados independientemente.

3.2 Degradación de azul de bromotimol

3.2.1 Efecto de UV

En la degradación de azul de bromotimol al aplicar la radiación UV (Tabla 6) se pudo observar una degradación del 0.815494393%, una eficiencia de absorbancia del 0.0973, un pH de 5.95, sin embargo, al final del tratamiento la decoloración de 310 fue nula dando un resultado similar al inicio del proceso con una pequeña variación de decimales, en un tiempo de 60 minutos. Lo que nos da que la degradación no genera algo significativo.

Tabla 6 Resultados del tratamiento UV

TIEMPO	COLOR	pH	UV		ANÁLISIS CUALITATIVO
			ABS	% DEGRADACIÓN	
0	320	6.35	0.0981	0	
10	285	5.92	0.0978	0.305810398	
20	390	5.93	0.0979	0.203873598	
30	275	5.95	0.097	1.121304791	
40	315	6.01	0.0962	1.936799185	

50	330	6.01	0.0962	1.936799185	
60	310	5.95	0.0973	0.815494393	

3.2.2 Efecto de H₂O₂

Para el tratamiento de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 7* que se tiene un porcentaje de degradación del -1.067615658%, una absorbancia de 0.1136, un pH de 5.43 y una decoloración del 320.

La *Tabla 8* presenta los resultados para el contaminante azul de bromotimol, utilizando concentración 1.5 ml de H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de 1.096892139%, una absorbancia de 0.1082, un pH de 5.53 y una decoloración del 285.

Por último, la *Tabla 9* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación de 3.310696095%, una absorbancia del 0.1139, un pH del 5.43 y una decoloración del 300 esto se debe a los subproductos generados, al efectuar el método de tratamiento.

La efectividad no varea mucho con nuestro resultado anterior con radiación UV (*Tabla 6*) pero en este caso tomando en cuenta nuestro mejor resultado de degradación el cual fue de 3.310696095% (*Tabla 9*) no siendo significativo.

Tabla 7 Resultados del tratamiento H₂O₂ a 1 ml.

TIEMPO	COLOR	pH	ABS	H ₂ O ₂ -1mL	ANÁLISIS CUALITATIVO
				% DEGRADACIÓN	
0	315	5.34	0.1124	0	
10	325	5.32	0.1127	-0.266903915	

20	315	5.28	0.1135	-0.978647687	
30	310	5.31	0.1135	-0.978647687	
40	305	5.42	0.113	-0.533807829	
50	315	5.46	0.1132	-0.711743772	
60	320	5.43	0.1136	-1.067615658	

Tabla 8 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 1.5ml

H ₂ O ₂ -1.5Ml					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	295	5.42	0.1094	0	
10	285	5.37	0.1091	0.274223035	
20	295	5.56	0.1105	-1.005484461	
30	275	5.53	0.1091	0.274223035	

40	275	5.52	0.109	0.365630713	
50	275	5.52	0.1092	0.182815356	
60	285	5.53	0.1082	1.096892139	

Tabla 9 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 2 ml

H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	270	5.26	0.1178	0	
10	305	5.27	0.1177	0.084889643	
20	305	5.30	0.117	0.679117148	
30	340	5.30	0.1167	0.933786078	
40	295	5.33	0.1088	7.640067912	
50	250	5.32	0.1075	8.743633277	
60	300	5.43	0.1139	3.310696095	

3.2.3 Efecto de O₃

El tratamiento con O₃ de la *Tabla 10* se observan los resultados obtenidos en un tiempo de 60 minutos, donde el porcentaje de degradación 3.106212425%, la absorbancia fue de 0.0967, un pH final de 4.53 y por último una decoloración de 20. Estos resultados no nos muestran algo significativo o superior a el mejor resultado obtenido hasta el momento de un porcentaje de degradación de 3.310696095% (Tabla 9).

Tabla 10 Resultados del tratamiento O₃

O ₃					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DERADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	190	7.5	0.0998	0	
10	190	6.66	0.0989	0.901803607	
20	125	6.4	0.0976	2.204408818	
30	100	5.56	0.0975	2.304609218	
40	50	4.96	0.0962	3.607214429	
50	35	4.71	0.0954	4.408817635	
60	20	4.53	0.0967	3.106212425	

3.2.4 Efecto de UV/H₂O₂

Para el tratamiento de UV/H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 11* se tiene un porcentaje de degradación del 5.62283737%, una absorbancia de 0.1091, un pH de 5.67y una decoloración del 315.

La *Tabla 12* presenta los resultados para el contaminante azul de bromotimol, utilizando concentración 1.5 ml de UV/H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de 5.982053838%, una absorbancia de 0.0943, un pH de 6.43y una decoloración del 285.

Por último, la *Tabla 13* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de UV/H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación de 1.936799185%, una absorbancia del 0.0962, un pH del 5.88 y una decoloración del 350.

Tomando los datos anteriores para el tratamiento de UV/H₂O₂ podemos decir que el mejor resultado fue una degradación de 5.982053838% (Tabla 12), superando lo obtenido en el tratamiento de H₂O₂, con un porcentaje de degradación de 3.310696095% (Tabla 9).

Tabla 11 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 1 ml

UV-H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	320	5.64	0.1156	0	
10	335	5.52	0.1141	1.297577855	
20	320	5.66	0.113	2.249134948	
30	320	5.84	0.1123	2.85467128	
40	310	5.58	0.1108	4.152249135	

50	300	5.68	0.1107	4.238754325	
60	315	5.67	0.1091	5.62283737	

Tabla 12 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 1.5 ml

UV-H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	285	5.7	0.1003	0	
10	260	6.21	0.0988	1.49551346	
20	280	6.55	0.0978	2.492522433	
30	275	6.50	0.097	3.290129611	
40	285	6.39	0.0994	0.897308076	
50	320	6.40	0.0969	3.389830508	

60	285	6.43	0.0943	5.982053838	
----	-----	------	--------	-------------	---

Tabla 13 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 2 ml

UV-H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	275	7.19	0.0981	0	
10	285	5.95	0.0976	0.509683996	
20	275	5.82	0.0995	-1.427115189	
30	295	5.93	0.0992	-1.121304791	
40	310	5.81	0.0989	-0.815494393	
50	285	5.95	0.0983	-0.203873598	
60	250	5.88	0.0962	1.936799185	

3.2.5 Efecto de O₃/H₂O₂

Para el tratamiento O₃/H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 14* que se tiene un porcentaje de degradación del 80.7738815%, una absorbancia de 0.0159, un pH de 4.00 y una decoloración del 6.

La *Tabla 15* presenta los resultados para el contaminante azul de bromotimol, utilizando concentración 1.5 ml de O₃/H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de 84.96240602%, una absorbancia de 0.016, un pH de 3.96 y una decoloración del 5.

Por último, la *Tabla 16* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de O₃/H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación de 82.87292818%, una absorbancia del 0.0124, un pH del 4.09 y una decoloración del 10.

Con este tratamiento de O₃/H₂O₂ podemos ver que se obtuvieron resultados positivos siendo el más alto de un porcentaje de degradación fue de 84.96240602% (*Tabla 15*), superando por mucho nuestro mejor resultado anterior el cual fue de porcentaje de degradación de 3.310696095% (*Tabla 9*) también hay que tener en cuenta la decoloración que fue de 5.

Tabla 14 Resultados del tratamiento O₃/H₂O₂ a 1 ml

O ₃ -H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	185	4.66	0.0827	0	
10	10	4.39	0.0305	63.11970979	
20	5	4.27	0.0228	72.43047158	
30	15	4.19	0.0175	78.83917775	

40	5	4.12	0.0163	80.29020556	
50	0	4.05	0.0159	80.7738815	
60	6	4.00	0.0159	80.7738815	

Tabla 15 Resultados del tratamiento O_3/H_2O_2 a 1.5 ml

O ₃ -H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	290	4.62	0.1064	0	
10	10	4.29	0.0312	70.67669173	
20	25	4.18	0.0274	74.2481203	
30	40	4.12	0.0215	79.79323308	
40	10	4.06	0.0182	82.89473684	
50	10	4.01	0.0171	83.92857143	

60	5	3.96	0.016	84.96240602	
----	---	------	-------	-------------	---

Tabla 16 Resultados del tratamiento O_3/H_2O_2 a 2 ml

$O_3-H_2O_2-2mL$					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRDACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	205	5.96	0.0724	0	
10	100	4.52	0.0267	63.12154696	
20	15	4.39	0.0191	73.61878453	
30	15	4.34	0.0153	78.86740331	
40	220	4.25	0.0142	80.38674033	
50	20	4.14	0.0153	78.86740331	
60	10	4.09	0.0124	82.87292818	

3.2.6 Efecto de O₃/UV

El tratamiento con O₃/UV de la *Tabla 17* se observan los resultados obtenidos en un tiempo de 60 minutos, donde el porcentaje de degradación 0.815494393%, la absorbancia fue de 0.0973, un pH final de 4.3 y por último una decoloración de 10. Con esto vimos una caída en el porcentaje de degradación porcentaje de degradación fue de 84.96240602% (Tabla 15).

Tabla 17 Resultados del tratamiento O₃/UV

TIEMPO	COLOR	pH	ABS	O ₃ -UV	ANÁLISIS CUALITATIVO
				% DEGRADACIÓN	
0	500	7.87	0.0981	0	
10	165	6.95	0.0978	0.305810398	
20	90	5.96	0.0979	0.203873598	
30	65	4.94	0.097	1.121304791	
40	40	4.58	0.0962	1.936799185	
50	15	4.32	0.0962	1.936799185	
60	10	4.3	0.0973	0.815494393	

3.2.7 Efecto de O₃/UV/H₂O₂

Para el tratamiento de O₃/UV/H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 18* que se tiene un porcentaje de degradación del 70.87719298%, una absorbancia de 0.0083, un pH de 4.28 y una decoloración del 30.

La *Tabla 19* presenta los resultados para el contaminante azul de bromotimol, utilizando concentración 1.5 ml de O₃/UV/H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de 73.12072893%, una absorbancia de 0.0118, un pH de 4.30 y una decoloración del 5.

Por último, la *Tabla 20* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de O₃/UV/H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación de 91.7740337%, una absorbancia del 0.0083, un pH del 4.29 y una decoloración del 0.

Aquí encontraremos nuestro mejor resultado superando a todos los anteriores con un porcentaje de degradación de 91.7740337% (Tabla 20).

Tabla 18 Resultados del tratamiento O₃/UV/ H₂O₂ a 1 ml

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADCIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	75	5.88	0.0285	0	
10	50	4.73	0.0211	25.96491228	
20	50	4.58	0.0153	46.31578947	
30	0	4.47	0.013	54.38596491	
40	0	4.38	0.0121	57.54385965	
50	35	4.31	0.0085	70.1754386	

60	30	4.28	0.0083	70.87719298	
----	----	------	--------	-------------	---

Tabla 19 Resultados del tratamiento $O_3/UV/H_2O_2$ a 1.5 ml

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADCIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	130	5.25	0.0439	0	
10	15	4.87	0.0229	47.83599089	
20	60	4.68	0.0155	64.69248292	
30	20	4.54	0.0135	69.24829157	
40	55	4.41	0.0117	73.34851936	
50	0	4.33	0.0124	71.75398633	
60	5	4.30	0.0118	73.12072893	

Tabla 20 Resultados del tratamiento $O_3/UV/H_2O_2$ a 2 ml

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADCIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	266	5.23	0.1009	0	
10	75	4.95	0.0354	64.91575818	
20	0	4.68	0.0212	78.98909812	
30	30	4.56	0.0169	83.25074331	
40	15	4.43	0.0131	87.01684836	
50	0	4.36	0.0078	92.26957384	
60	0	4.29	0.0083	91.7740337	

3.3 Degradación de negro ácido 58

3.3.1 Efecto de UV

En la degradación negro ácido 58 al aplicar la radiación UV (Tabla 21) se pudo observar una degradación del -7.0432357%, una eficiencia de absorbancia del 0.4605, un pH de 4.55, sin embargo, al final del tratamiento la decoloración de 500, en un tiempo de 60 minutos. Con el resultado negativo que nos da la degradación no genera algo significativo.

Tabla 21 Resultados del tratamiento UV

TIEMPO	COLOR	pH	ABS	UV	ANÁLISIS CUALITATIVO
				% DEGRADACIÓN	
0	500	4.58	0.4302	0	
10	500	4.50	0.4647	-8.0195258	
20	500	4.55	0.4635	-7.74058577	
30	500	4.55	0.4689	-8.9958159	
40	500	4.55	0.4631	-7.64760576	
50	500	4.55	0.4655	-8.20548582	
60	500	4.55	0.4605	-7.0432357	

3.3.2 Efecto de H₂O₂

Para el tratamiento de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 22* que se tiene un porcentaje de degradación del -2.53686036%, una absorbancia de 0.4634, un pH de 4.34 y una decoloración del 500.

La *Tabla 23* presenta los resultados para el contaminante azul de bromotimol, utilizando concentración 1.5 ml de H_2O_2 . El porcentaje de degradación fue de -19.7402597%, una absorbancia de 0.1082, un pH de 5.53 y una decoloración del 500.

Por último, la *Tabla 24* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de H_2O_2 . Se obtuvo un porcentaje de degradación de -14.217633%, una absorbancia del 0.4314, un pH del 4.52 y una decoloración del 500.

Los resultados son mejores que el anterior de una degradación del -7.0432357% (Tabla 21), teniendo en estos el resultado más favorable de degradación del -2.53686036% (Tabla 22).

Tabla 22 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 1 mL

H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	4.34	0.4612	0	
10	500	4.34	0.4711	-2.14657415	
20	500	4.34	0.4702	-1.95143105	
30	500	4.34	0.4667	-1.1925412	
40	500	4.34	0.4634	-0.47701648	

50	500	4.34	0.4707	-2.05984389	
60	500	4.34	0.4729	-2.53686036	

Tabla 23 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 1.5 mL

H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	4.61	0.385	0	
10	500	4.7	0.4267	-10.8311688	
20	500	4.60	0.4459	-15.8181818	
30	500	4.60	0.4596	-19.3766234	
40	500	4.58	0.4617	-19.9220779	

50	500	4.55	0.4628	-20.2077922	
60	500	4.54	0.461	-19.7402597	

Tabla 24 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 2 mL

H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	4.5	0.3777	0	
10	500	4.44	0.4161	-10.166799	
20	500	4.62	0.4248	-12.4702145	
30	500	4.53	0.4298	-13.7940164	
40	500	4.53	0.4342	-14.9589621	

50	500	4.50	0.4355	-15.3031506	
60	500	4.52	0.4314	-14.217633	

3.3.3 Efecto de O₃

El tratamiento con O₃ de la *Tabla 25* se observan los resultados obtenidos en un tiempo de 60 minutos, donde el porcentaje de degradación 53.2601235%, la absorbancia fue de 0.1362, un pH final de 3.81 y por último una decoloración de 465. Los resultados son favorables superando por demasiado a el resultado anterior.

Tabla 25 Resultados del tratamiento O₃

TIEMPO	COLOR	pH	ABS	O ₃	ANÁLISIS CUALITATIVO
				% DEGRADACIÓN	
0	500	4.42	0.2914	0	
10	500	4.16	0.2002	31.297186	
20	500	4.01	0.176	39.6019218	
30	475	3.77	0.1559	46.4996568	

40	440	3.88	0.1384	52.5051476	
50	345	3.64	0.128	56.0741249	
60	465	3.81	0.1362	53.2601235	

3.3.4 Efecto de UV/ H₂O₂

Para el tratamiento de UV/H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 26* se tiene un porcentaje de degradación del -6.73640167%, una absorbancia de 0.5102, un pH de 5.50y una decoloración del 500.

La *Tabla 27* presenta los resultados para el contaminante negro acido 58, utilizando concentración 1.5 ml de UV/H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de -1.67125442%, una absorbancia de 0.5171, un pH de 5.70y una decoloración del 500.

Por último, la *Tabla 28* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de UV/H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación de 1.31968146%, una absorbancia del 0.4337, un pH del 5.73 y una decoloración del 500.

Los resultados bajaron considerablemente ya que llegamos a abarcar valores negativos siendo el mejor obtenido el de un porcentaje de degradación de 1.31968146% (Tabla 28) que es el más destacable, pero continuando con nuestro mejor resultado de porcentaje de degradación 53.2601235% (Tabla 25).

Tabla 26 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 1 mL

UV-H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.70	0.478	0	
10	500	5.70	0.5053	-5.71129707	
20	500	5.50	0.5165	-8.05439331	
30	500	5.17	0.5135	-7.42677824	
40	500	5.24	0.5135	-7.42677824	
50	500	5.50	0.5124	-7.19665272	
60	500	5.50	0.5102	-6.73640167	

Tabla 27 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 1.5 mL

UV-H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.61	0.5086	0	
10	500	5.43	0.5197	-2.18246166	
20	500	5.52	0.5224	-2.71333071	
30	500	5.66	0.5228	-2.79197798	
40	500	5.50	0.5184	-1.92685804	
50	500	5.71	0.5178	-1.80888714	
60	500	5.70	0.5171	-1.67125442	

Tabla 28 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 2 mL

UV-H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.52	0.4395	0	
10	500	5.50	0.4439	-1.00113766	
20	500	5.58	0.4402	-0.1592719	
30	500	5.50	0.443	-0.7963595	
40	500	5.68	0.4341	1.22866894	
50	500	5.70	0.4368	0.61433447	
60	500	5.73	0.4337	1.31968146	

3.3.5 Efecto de O₃/ H₂O₂

Para el tratamiento O₃/H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 29* que se tiene un porcentaje de degradación del 78.4132098%, una absorbancia de 0.0536, un pH de 2.94 y una decoloración del 200.

La *Tabla 30* presenta los resultados para el contaminante azul de bromotimol, utilizando concentración 1.5 ml de O₃/H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de 83.7271511%, una absorbancia de 0.073, un pH de 2.76 y una decoloración del 285.

Por último, la *Tabla 31* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de O₃/H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación 8.67689838%, una absorbancia del 0.9104, un pH del 3.16 y una decoloración del 50.

Con este tratamiento de O₃/H₂O₂ podemos ver que se obtuvieron resultados positivos siendo el más alto de un porcentaje de degradación fue de 83.7271511% (*Tabla 30*), superando por mucho nuestro mejor resultado anterior el cual fue de porcentaje de degradación de 53.2601235% (*Tabla 25*).

Tabla 29 Resultados del tratamiento O₃/H₂O₂ a 1 mL

O ₃ -H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	4.23	0.2483	0	
10	475	3.34	0.1327	46.5565848	
20	425	3.11	0.1155	53.4836891	
30	330	3.12	0.0955	61.5384615	

40	305	3.02	0.0821	66.9351591	
50	260	3.09	0.0648	73.9025373	
60	200	2.94	0.0536	78.4132098	

Tabla 30 Resultados del tratamiento O_3/H_2O_2 a 1.5 mL

O ₃ -H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	3.34	0.4486	0	
10	500	3.02	0.224	50.0668747	
20	500	2.98	0.1525	66.00535	
30	490	2.81	0.1234	72.4921979	
40	415	2.86	0.101	77.4855105	

50	340	2.77	0.0808	81.9884084	
60	285	2.76	0.073	83.7271511	

Tabla 31 Resultados del tratamiento O_3/H_2O_2 a 2 mL

O ₃ -H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.04	0.9969	0	
10	500	3.75	0.9795	1.74541077	
20	500	3.50	0.9484	4.86508175	
30	480	3.53	0.9423	5.47697863	
40	425	3.24	0.9311	6.60046143	
50	395	3.16	0.9104	8.67689838	

3.3.6 Efecto de O₃/ UV

El tratamiento con O₃/UV de la *Tabla 32* se observan los resultados obtenidos en un tiempo de 60 minutos, donde el porcentaje de degradación 88.4164859%, la absorbancia fue de 0.0534, un pH final de 2.97 y por último una decoloración de 250. Con esto se ve un incremento en el porcentaje de degradación al obtenido anteriormente de 83.7271511% (Tabla 30).

Tabla 32 Resultados del tratamiento O₃/UV

O ₃ -UV					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	3.98	0.461	0	
10	500	3.14	0.1352	70.6724512	
20	425	3.06	0.1051	77.2017354	
30	355	3.06	0.0914	80.1735358	
40	330	2.97	0.0778	83.1236443	
50	260	3.06	0.061	86.7678959	

60	250	2.97	0.0534	88.4164859	
----	-----	------	--------	------------	---

3.3.7 Efecto de O₃/ UV/ H₂O₂

Para el tratamiento de O₃/UV/H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 33* que se tiene un porcentaje de degradación del 81.125498%, una absorbancia de 0.1137, un pH de 3.98 y una decoloración del 485.

La *Tabla 34* presenta los resultados para el contaminante azul de bromotimol, utilizando concentración 1.5 ml de O₃/UV/H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de 79.4092244%, una absorbancia de 0.1192, un pH de 3.85 y una decoloración del 60.

Por último, la *Tabla 35* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de O₃/UV/H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación de 84.76065%, una absorbancia del 0.0694, un pH del 3.08 y una decoloración del 310.

Tenemos buenos resultados, pero nada significativo a considerar comparando con lo obtenido en la *tabla 32*.

Tabla 33 Resultados del tratamiento O₃/UV/ H₂O₂ a 1 mL

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.30	0.6024	0	
10	500	4.49	0.2613	56.623506	
20	500	4.30	0.1963	67.4136786	

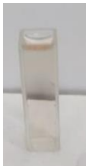
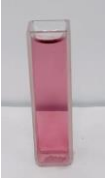
30	500	4.21	0.1646	72.6759628	
40	500	4.13	0.1435	76.1786189	
50	500	4.06	0.1306	78.3200531	
60	485	3.98	0.1137	81.125498	

Tabla 34 Resultados del tratamiento $O_3/UV/H_2O_2$ a 1.5 mL

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.02	0.5789	0	
10	500	4.42	0.3067	47.0202107	
20	500	4.23	0.2311	60.079461	

30	500	4.12	0.1791	69.0620142	
40	500	4.00	0.1586	72.603213	
50	500	3.92	0.143	75.2979789	
60	490	3.85	0.1192	79.4092244	

Tabla 35 Resultados del tratamiento $O_3/UV/H_2O_2$ a 2 mL

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	8.22	0.4554	0	
10	500	8.22	0.1506	66.9301713	
20	480	4.38	0.1206	73.5177866	

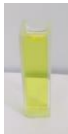
30	415	3.60	0.1034	77.294686	
40	420	3.67	0.0923	79.7321036	
50	415	3.28	0.0804	82.345191	
60	310	3.08	0.0694	84.76065	

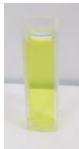
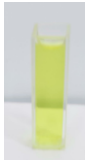
3.4 Degradación de tartrazina

3.4.1 Efecto de UV

En la degradación de la tartrazina al aplicar la radiación UV (Tabla 36) se pudo observar una degradación del -0.73105702%, una eficiencia de absorbancia del 1.1712, un pH de 4.49, sin embargo, al final del tratamiento la decoloración fue nula dando el mismo resultado que, al inicio del proceso, dicho resultado fue de 500 en un tiempo de 60 minutos. Lo que nos da que la degradación no genera algo significativo.

Tabla 36 Resultados del tratamiento UV

TIEMPO	COLOR	pH	ABS	UV	ANÁLISIS CUALITATIVO
				% DEGRADACIÓN	
0	500	4.73	1.1627	0	

10	500	4.67	1.1619	0.06880537	
20	500	4.45	1.1641	-0.12040939	
30	500	4.43	1.163	-0.02580201	
40	500	4.43	1.1627	0	
50	500	4.51	1.1649	-0.18921476	
60	500	4.49	1.1712	-0.73105702	

3.4.2 Efecto de H₂O₂

El siguiente experimento al aplicar peróxido de hidrogeno (H₂O₂) a concentración de 1 mL nos da como resultado la degradación de -0.25372661%, con una absorbancia del 0.9483, una baja en el pH de 4.61 y desafortunadamente una decoloración de 500 esto durante un periodo de 60 minutos. sigue siendo irrelevante por el resultado de degradación negativo demuestra que ni el UV ni el H₂O₂ por sí solos afectan a la tartrazina.

Tabla 37 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 1 ml

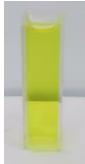
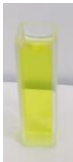
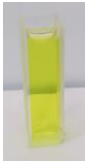
H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.68	0.9459	0	
10	500	5.49	0.9454	0.05285971	
20	500	5.19	0.9431	0.29601438	
30	500	5.18	0.9456	0.03171583	
40	500	4.63	0.9478	-0.2008669	
50	500	4.62	0.9483	-0.25372661	
60	500	4.61	0.9483	-0.25372661	

Tabla 38 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 1.5 ml

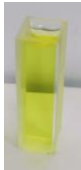
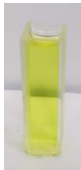
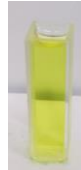
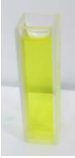
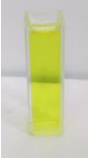
H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	FOTO
0	500	4.29	0.942	0	
10	500	4.20	0.9417	0.03184713	
20	500	4.30	0.9425	-0.05307856	
30	500	4.49	0.9399	0.22292994	
40	500	4.49	0.9397	0.24416136	
50	500	4.54	0.9394	0.27600849	
60	500	4.85	0.9383	0.39278132	

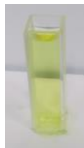
Tabla 39 Resultados del tratamiento H_2O_2 a 2 ml

H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	FOTO
0	500	4.91	-0.0523	0	
10	500	4.85	1.3139	2612.23709	
20	500	4.81	1.3169	2617.97323	
30	500	4.83	1.3158	2615.86998	
40	500	4.8	1.3166	2617.39962	
50	500	4.81	1.3193	2622.56214	
60	500	4.83	1.3158	2615.86998	

3.4.3 Efecto de O₃

El procedimiento de O₃ a comparación de los experimentos anteriores, este arroja los mejores resultados (*Tabla 40*), donde podemos visualizar una degradación 62.0851018%, un porcentaje de absorbancia de 0.3484, una baja en el pH de pH 3.97 y por último una decoloración de 500. Esto demostró una gran efectividad a los resultados anteriores (*Tabla 38* y *Tabla 39*) los cuales fueron negativo, El O₃ por sí solo fue muy efectivo, logrando una degradación considerable.

Tabla 40 Resultados del tratamiento O₃

O ₃					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.36	0.9189	0	
10	500	4.41	0.758	17.5100664	
20	500	4.36	0.6473	29.5570791	
30	500	4.26	0.5567	39.4166939	
40	500	4.09	0.4694	48.9171836	
50	500	4.08	0.4062	55.7949722	

60	500	3.97	0.3484	62.0851018	
----	-----	------	--------	------------	---

3.4.4 Efecto de UV/ H₂O₂

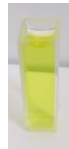
Para el tratamiento de UV/H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de 1ml podemos visualizar en la *Tabla 41*, que durante un tiempo de 60 minutos se tiene un porcentaje de degradación del 0.04533092%, un porcentaje de absorbancia de 0.882, un pH de 4.31 y una decoloración del 500.

La *tabla 42*, presenta los resultados se tuvieron con respecto al tartrazina, la concentración de 1.5 ml UV/H₂O₂. El porcentaje de degradación fue de 0.5%, un porcentaje de absorbancia de 1.1343%, un pH del 4.20 y una decoloración del 500.

Por último, en la *tabla 43* muestra los resultados para la concentración de 2 ml de H₂O₂. Se obtuvo un porcentaje de degradación 0.38087177%, una absorbancia de 1.177, un pH del 5.96 y una decoloración del 500.

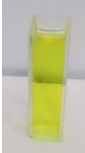
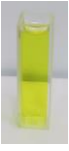
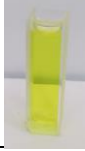
La efectividad cae drásticamente comparándolos con resultados anteriores (Tabla 40). Los resultados volvieron a ser casi nulos con el más alto porcentaje de degradación al pasar los 60 minutos fue de 5%.

Tabla 41 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 1 ml

UV-H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	4.62	0.8824	0	
10	500	4.46	0.877	0.61196736	
20	500	4.29	0.8765	0.66863101	

30	500	4.25	0.8752	0.81595648	
40	500	4.31	0.8731	1.05394379	
50	500	4.31	0.8746	0.88395286	
60	500	4.31	0.882	0.04533092	

Tabla 42 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 1.5 ml

UV-H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	4.22	1.14	0	
10	500	4.23	1.142	-0.1754386	
20	500	4.17	1.1392	0.07017544	
30	500	4.19	1.1384	0.14035088	
					

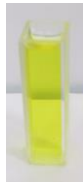
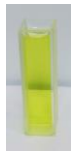
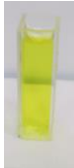
40	500	4.20	1.1449	-0.42982456	
50	500	4.20	1.0961	3.85087719	
60	500	4.20	1.1343	0.5	

Tabla 43 Resultados del tratamiento UV/H₂O₂ a 2 ml

UV-H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.47	1.1815	0	
10	500	5.58	1.1999	-1.55734236	
20	500	5.7	1.179	0.21159543	
30	500	5.76	1.181	0.04231909	

40	500	5.80	1.1755	0.50782903	
50	500	5.96	1.177	0.38087177	
60	500	5.96	1.177	0.38087177	

3.4.5 Efecto de O_3 / H_2O_2

Para el tratamiento de O_3 / H_2O_2 se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml, todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 44* se tiene un porcentaje de degradación del 41.2169043%, un porcentaje de absorbancia de 0.6927%, un pH de 2.95 y una decoloración del 500.

La *Tabla 45* presenta los resultados para la contaminante tartrazina, utilizando concentración 1.5 ml de O_3 / H_2O_2 . El porcentaje de degradación fue de 35.8172644%, un porcentaje de absorbancia de 0.7123%, un pH del 2.96 y una decoloración del 500.

Por último, se muestra en la *tabla 46* el O_3 / H_2O_2 se le agregó una concentración de 2 ml los resultados fueron los siguientes la degradación obtuvo una eficiencia de 34.5053996%, un porcentaje de absorbancia del 0.7581%, un pH del 2.91 y una decoloración del 500.

La degradación mejora significativamente respecto lo realizado anteriormente con UV/ H_2O_2 (Tabla 41, Tabla 42 y Tabla 43). Aumentando considerablemente con un 41.2169043% (Tabla 42) Sin embargo, es notablemente peor que usar O_3 solo que logró 62.08% (Tabla 40).

Tabla 44 Resultados del tratamiento O_3/H_2O_2 a 1 ml

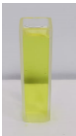
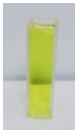
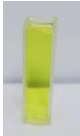
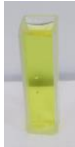
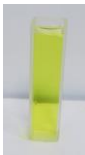
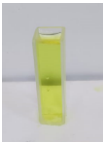
$O_3-H_2O_2-1mL$					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	3.28	1.1784	0	
10	500	3.2	1.067	9.45349627	
20	500	3.1	0.96	18.5336049	
30	500	3.14	0.8841	24.9745418	
40	500	2.98	0.8118	31.1099796	
50	500	9.98	0.7522	36.167685	
60	500	2.95	0.6927	41.2169043	

Tabla 45 Resultados del tratamiento O_3/H_2O_2 a 1.5 ml

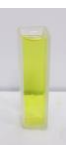
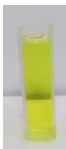
O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	3.55	1.2657	0	
10	500	3.33	1.1763	7.06328514	
20	500	3.32	1.0964	13.3759975	
30	500	3.28	1.0289	18.7090148	
40	500	3.17	0.9725	23.165047	
50	500	3.19	0.9133	27.8423007	
60	500	3.10	0.8592	32.1166153	

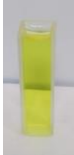
Tabla 46 Resultados del tratamiento O_3/H_2O_2 a 2 ml

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	3.4	1.2709	0	
10	500	3.22	1.1602	8.71036274	
20	500	3.15	1.0834	14.7533244	
30	500	3.04	0.955	24.856401	
40	500	2.89	0.8396	33.9365804	
50	500	2.78	0.8065	36.5410339	
60	500	2.67	0.763	39.9638052	

3.4.6 Efecto de O₃/ UV

El procedimiento de *o₃/UV* a comparación de los experimentos anteriores, este arrojo los mejores resultados (*Tabla 47*), donde podemos visualizar una degradación 51.3228008%, un porcentaje de absorbancia de 0.5207%, una baja en el pH de pH 3.35 y por último una decoloración de 500. La degradación fue del **51.32%**. Este resultado es mejor que O₃/H₂O₂ que alcanzo un 41.2169043% (*Tabla 44*), aunque sigue sin ser mejor a lo alcanzado, usando O₃ con un 62.0851018% (*Tabla 40*).

Tabla 47 Resultados del tratamiento O₃/UV

O ₃ -UV					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.06	1.0697	0	
10	500	4.33	0.9065	15.256614	
20	500	4.04	0.8102	24.2591381	
30	500	3.7	0.7151	33.1494812	
40	500	3.56	0.6373	40.4225484	
50	500	3.45	0.5692	46.7888193	
60	500	3.35	0.5207	51.3228008	

3.4.7 Efecto de O₃/ UV/ H₂O₂

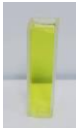
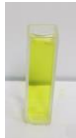
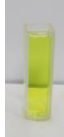
Para el tratamiento de O₃/ UV/ H₂O₂ se realizaron tres tipos de concentraciones a 1 ml, 1.5 ml y 2ml todos estos a un tiempo de 60 minutos. En el caso de la concentración de 1 ml se puede visualizar en la *Tabla 48* se tiene un porcentaje de degradación del 27.1759549%, un porcentaje de absorbancia de 0.9304%, un pH de 3.30 y una decoloración del 500.

La tabla 49, presenta los resultados se tuvieron con respecto a la tartrazina, la concentración del O₃/UV/H₂O₂ fue de 1.5 ml el porcentaje de degradación fue de 32.1166153%, un porcentaje de absorbancia de 0.8592%, un pH del 3.10 y una decoloración del 500.

Por último, se muestra en la tabla 50 el O₃/UV/H₂O₂ se le agregó una concentración de 2 ml los resultados fueron los siguientes la degradación obtuvo una eficiencia de 39.9638052%, un porcentaje de absorbancia del 0.763%, un pH del 2.67 y una decoloración del 500.

La eficiencia vuelve a bajar. El mejor resultado de la triple combinación fue de 39.96% de degradación (Tabla 50), mejorando con respecto a los anteriores datos, pero seguimos corroborando que los mejores resultados son usando O₃ con un 62.0851018% (Tabla 40).

Tabla 48 Resultados del tratamiento O₃/UV/H₂O₂ a 1 ml

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -1mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	5.60	1.2776	0	
10	500	4.17	1.1447	10.4023168	
20	500	3.85	1.0667	16.5075141	
30	500	3.59	1.0286	19.4896681	

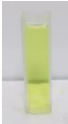
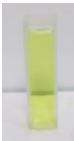
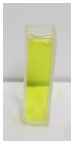
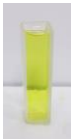
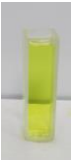
40	500	3.4	0.9491	25.712273	
50	500	3.33	0.8928	30.1189731	
60	500	3.30	0.9304	27.1759549	

Tabla 49 Resultados del tratamiento $O_3/UV/H_2O_2$ a 1.5 ml

O ₃ -UV-H ₂ O ₂ -1.5mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	3.55	1.2657	0	
10	500	3.33	1.1763	7.06328514	
20	500	3.32	1.0964	13.3759975	
30	500	3.28	1.0289	18.7090148	
40	500	3.17	0.9725	23.165047	

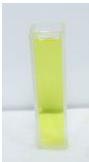
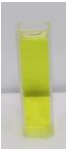
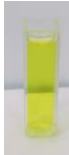
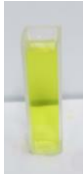
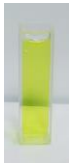
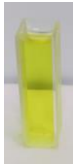
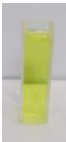
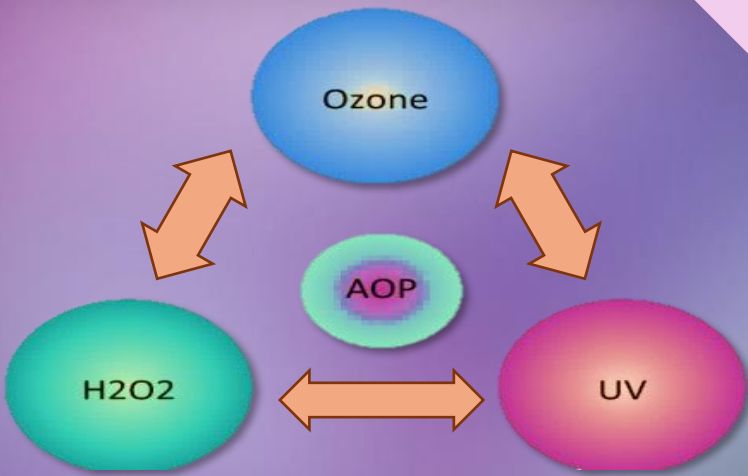
50	500	3.19	0.9133	27.8423007	
60	500	3.10	0.8592	32.1166153	

Tabla 50 Resultados del tratamiento $O_3/UV/H_2O_2$ 2 ml

O_3-UV-H_2O_2-2mL					
TIEMPO	COLOR	pH	ABS	% DEGRADACIÓN	ANÁLISIS CUALITATIVO
0	500	3.4	1.2709	0	
10	500	3.22	1.1602	8.71036274	
20	500	3.15	1.0834	14.7533244	
30	500	3.04	0.955	24.856401	
40	500	2.89	0.8396	33.9365804	
50	500	2.78	0.8065	36.5410339	

60	500	2.67	0.763	39.9638052	
----	-----	------	-------	------------	---



CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Conclusión del Apartado 3.2: Degradación de azul de bromotimol

El estudio de la degradación del Azul de Bromotimol, detallado en las (Tablas 6 a 20), revela que este colorante es notablemente resistente a los Procesos de Oxidación cuando se aplican de forma individual. Los métodos simples mostraron una eficacia casi nula; por ejemplo, el tratamiento con UV (Tabla 6) apenas alcanzó un 0.815494393% de degradación, y el tratamiento con O_3 (Tabla 10) fue similar, con un 3.310696095%. Incluso el mejor de los métodos simples, H_2O_2 a 2 ml (Tabla 9), solo logró un 3.310696095 % de degradación.

La importancia de la sinergia entre oxidantes se vuelve evidente al combinar los métodos. El sistema O_3/H_2O_2 a 1.5 ml (Tabla 15) demostró un salto drástico en la eficiencia, alcanzando un 84.96240602% de degradación. Sin embargo, el hallazgo más significativo es que para este contaminante, la máxima eficiencia se logra con la combinación de los tres componentes. El sistema $O_3/UV/H_2O_2$ a 2 ml (Tabla 20) se destacó como el método definitivo, alcanzando el mayor porcentaje de degradación de todo el estudio con un 91.7740337%, logrando además una decoloración total. Esto demuestra de forma concluyente que la estructura del Azul de Bromotimol requiere la generación masiva y sostenida de radicales hidroxilos ($O_3/UV/H_2O$) que solo esta triple sinergia puede proveer.

Conclusión del Apartado 3.3: Degradación de negro ácido 58

Los resultados de la degradación del Negro Ácido 58 (Tablas 21 a 35) muestran un comportamiento químico muy diferente al del Azul de Bromotimol. Este colorante demostró ser completamente resistente a la radiación UV sola (Tabla 21) y a la aplicación de H_2O_2 en todas sus concentraciones (Tablas 22-24), los cuales arrojaron porcentajes de degradación negativos, indicando una total ineficacia.

El componente activo clave para este contaminante fue el ozono. El tratamiento con O_3 solo (Tabla 25) fue el primer método en mostrar resultados positivos, logrando una degradación considerable del 53.2601235%. La eficiencia mejoró sustancialmente al combinar el ozono con peróxido, donde el sistema O_3/H_2O_2 a 1.5 ml (Tabla 30) alcanzó un 83.7271511%. No obstante, el resultado óptimo se encontró con la combinación O_3/UV (Tabla 32), la cual logró el porcentaje más alto de degradación para este colorante con un 88.4164859%. Es importante notar que, a diferencia del Azul de Bromotimol, añadir H_2O_2 a este sistema óptimo (O_3/UV) fue contraproducente, ya que la triple combinación $O_3/UV/H_2O_2$ (Tablas 33-35) no logró superar este 88.4164859%. Esto sugiere que la degradación del Negro Ácido 58 se ve maximizada por la sinergia entre la ozonólisis y la fotólisis UV, sin requerir el peróxido.

Conclusión del Apartado 3.4: Degradación de tartrazina

El análisis de la Tartrazina (Tablas 36 a 50) arroja el hallazgo más particular del capítulo y subraya la especificidad química. Este colorante fue totalmente resistente a la radiación UV (Tabla 36) y al H_2O_2 (Tabla 37), así como a la combinación de ambos, UV/ H_2O_2 (Tablas 41-43), mostrando en todos los casos degradaciones nulas o negativas.

De manera sorprendente, el método más efectivo para la Tartrazina fue el sistema más simple: O_3 solo (Tabla 40), el cual alcanzó un porcentaje de degradación del 62.0851018%. A diferencia de los otros dos colorantes, cualquier intento de combinar el ozono con otros componentes resultó en una *disminución* de la eficiencia. Por ejemplo, el sistema $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ (Tabla 44) bajó la degradación al 41.2169043%, el O_3/UV (Tabla 47) la redujo al 51.3228008%, y la triple combinación (Tabla 48) apenas llegó al 39.9638052%. Esto sugiere que la ruta de degradación principal para la Tartrazina es la ozonólisis directa, y la adición de UV o H_2O_2 introduce reacciones competitivas que consumen el ozono de manera menos eficiente o interfieren con el ataque directo a la molécula del colorante.

Conclusión General del Capítulo 3

El Capítulo 3 demuestra inequívocamente que no existe un proceso universalmente "superior". La eficacia de un tratamiento está intrínsecamente ligada a la estructura química específica de cada contaminante. Los resultados revelan tres escenarios distintos:

1. Para el Azul de Bromotimol, una molécula que requiere el máximo poder oxidativo, la triple combinación $\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ (Tabla 20) fue la única capaz de lograr una degradación casi total (91.7740337%).
2. Para el Negro Ácido 58, el mecanismo óptimo fue una sinergia dual diferente, O_3/UV (Tabla 32), que alcanzó un 88.4164859% de degradación.
3. Para la Tartrazina, se observó un efecto inhibitorio, donde el sistema más simple, O_3 solo (Tabla 40), fue el más efectivo (62.0851018%), y cualquier combinación resultó contraproducente.

Esta disparidad de resultados es la conclusión más importante del capítulo, ya que subraya la necesidad absoluta de realizar estudios de tratabilidad a escala de laboratorio para cada efluente industrial específico. La implementación de un sistema sin un análisis previo del contaminante objetivo puede llevar a una selección de tecnología ineficiente, costosa y, como en el caso de la Tartrazina, subóptima.

Conclusión general

La presente investigación aborda de manera integral uno de los desafíos ambientales más críticos de la era industrial: la contaminación del agua por colorantes sintéticos. El estudio se centra en el Azul de Bromotimol (AB), el Negro Ácido 58 y la Tartrazina, compuestos ampliamente utilizados en diversas industrias que, al ser vertidos en efluentes, se convierten en contaminantes persistentes. El documento subraya que los métodos convencionales de tratamiento de aguas son en gran medida ineficaces contra estas moléculas complejas, las cuales representan una amenaza significativa tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud humana, con efectos nocivos reportados en órganos como el hígado, los riñones y el corazón.

El objetivo central del trabajo fue evaluar y optimizar la eficacia—específicamente el uso de ozono (O_3), radiación ultravioleta (UV) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), tanto en sistemas simples como combinados— como una alternativa tecnológica viable y sostenible. Para ello, se diseñó e implementó un sistema experimental robusto, destacando un reactor de vidrio en espiral que maximiza el contacto entre la solución contaminada y los agentes oxidantes.

Los resultados de la investigación validan de forma concluyente la alta eficacia, pero con un hallazgo crucial: la configuración óptima del tratamiento es altamente específica para la estructura química de cada colorante.

1. El logro más significativo se observó en la degradación del Azul de Bromotimol. La combinación sinérgica O_3 /UV/ H_2O_2 (con 2 ml de H_2O_2) se destacó como la más eficiente, alcanzando un notable 91.7740337% de degradación y logrando una decoloración completa del 100% en 60 minutos. Esto se atribuye a la generación masiva de radicales hidroxilos ($\bullet OH$).
2. En contraste, para el Negro Ácido 58, la triple combinación no fue la más efectiva. El mejor rendimiento se obtuvo con el sistema dual O_3 /UV, que alcanzó un 88.4164859% de degradación.
3. De manera aún más particular, para la Tartrazina, el sistema más simple, O_3 solo, demostró ser el más eficaz con un 62.08% de degradación, mientras que las combinaciones (como O_3 / H_2O_2 o O_3 /UV/ H_2O_2) resultaron ser contraproducentes, disminuyendo la eficiencia del 62.0851018%.

En conclusión, este estudio no solo demuestra la viabilidad técnica y la superioridad sobre los métodos tradicionales para la remediación de efluentes con colorantes, sino que también aporta un conocimiento fundamental sobre la especificidad de estos procesos. El trabajo valida una solución tecnológica escalable y amigable con el medio ambiente que se alinea con los objetivos globales de agua limpia y saneamiento. Al proporcionar una "hoja de ruta" científica para optimizar tratamientos según el contaminante, esta tesis sienta las bases para la implementación industrial de tecnologías más limpias y fomenta una gestión más responsable de los recursos hídricos, un paso esencial hacia un futuro sostenible.

Recomendaciones

Optimización de procesos: Continuar investigando las combinaciones de métodos de oxidación avanzada (UV, O₃ y H₂O₂) para mejorar la eficiencia y reducir costos.

Monitoreo ambiental: Implementar sistemas de monitoreo continuo en industrias que utilicen colorantes sintéticos como el Azul de Bromotimol, Negro Ácido 58 y Tartrazina para prevenir descargas sin tratamiento.

Escalabilidad: Explorar la viabilidad de estos métodos en escalas mayores, considerando su integración en procesos industriales existentes.

Capacitación técnica: Fomentar la capacitación en el uso de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales en la comunidad científica e industrial.

Referencias

Examen de agua y aguas residuales** (23ª ed.). Prensa APHA.**

Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2017). *Biology* (11th ed.). Pearson.

Boyer, R. F. (2012). *Concepts in Biochemistry* (4th ed.). Wiley.

Gonzalez, A. (2023). *Porque el agua es liquida a temperatura ambiente. ¿Por Que ?*
Recuperado 25 de enero de 2025, de <https://dudasytextos.com/pregunta-por-que/porque-el-agua-es-liquida-a-temperatura-ambiente/>

Dawson, R. M., Elliott, D. C., Elliott, W. H., & Jones, K. M. (1986). *Data for Biochemical Research* (3rd ed.). Oxford University Press.

American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). APHA Press.

Martos-López, Á. (2016). La importancia del agua para nuestro planeta.

Gleick, P. H. (1996). *Water resources*. In *Encyclopedia of Climate and Weather* (Vol. 2, pp. 817–823). Oxford University Press.

UNESCO. (2020). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2020: agua y cambio climático. Publicaciones de la UNESCO.

Galaviz Villa, I. & Sosa Villalobos, C.A. (2019). Fuentes Difusas y Puntuales de Contaminación. Calidad de las Aguas Superficiales y Subterráneas. Universidad Autónoma de Campeche, 142.

López, J., Fernández, C., & Torres, R. (2021). Gestión de residuos sólidos en la industria alimentaria. Editorial Sostenible.

Rodríguez, H., & Pérez, S. (2020). Contaminación hídrica y estrategias de mitigación en el sector alimenticio. Editorial EcoAlternativas.

Gómez, A., Martínez, L., & Ramírez, P. (2019). Impactos ambientales de la industria alimenticia. *Revista de Ecología y Medio Ambiente*, 34(2), 56-72.

Pérez, M., & Fernández, G. (2022). Eficiencia energética y reducción de emisiones en la industria de alimentos. *Revista Energías Limpias*, 10(1), 12-25.

Lifeder. (23 de junio de 2022). *Azul de bromotimol*. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/azul-de-bromotimol/>.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2001). Toxicological Profile for Bromine. U.S. Department of Health and Human

Mittal, P., Jain, K., & Mittal, G. (2020). Use of pH indicators in obstetrics and gynecology. *International Journal of Medical Sciences and Public Health*

Ahluwalia, VK y Aggarwal, R. (2005). Química Orgánica Práctica Integral: Análisis Cualitativo. Prensa Universitaria.

European Chemicals Agency (ECHA). (2017). Bromothymol Blue (C.I. 15510).

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2019). Bromothymol Blue. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2001). Toxicological Profile for Bromine. U.S. Department of Health and Human

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2007). Aspectos de salud de los compuestos de bromo. Criterios de salud ambiental 230. Ginebra: Prensa de la OMS.

Tabarez De León, A. (2022). Efecto de la exposición del colorante textil negro ácido 52 (NA52) en solución acuosa, ante un plasma no térmico.

Del Consumidor, P. F. (2020). Informa Profeco sobre colorantes artificiales en los alimentos. En *gob.mx*. Recuperado 5 de febrero de 2025.

Zaruma, P., Proal, J., Hernández, I. C., & Salas, H. I. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (19), 38-47.

Asociación Española de Alérgicos a Alimentos y Látex (2019). Alergia a alimentos. Alergia al látex. Guía para profesores. Madrid: AEPNAA.

Škrabáková, L. (2015). 3.4 Rojo y negro. Propiedades medicinales de los dos colorantes más importantes en la medicina tradicional peruana. *Etnobotánica y fitoterapia en América*, 92.

Barrios Ziolo, L. F., Gaviria Restrepo, L. F., Agudelo, E. A., & Cardona Gallo, S. A. (2016). Estudio de la toxicidad asociada al vertimiento de aguas residuales con presencia de colorantes y pigmentos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Revista EIA*, (26), 61-74.

DE COLORANTES, A. D. H. D. (2004). *CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIOTECNOLOGIA APLICADA* (Doctoral dissertation, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL).

Arrieta-Rúa, Y. P., Burgos-Salazar, A. M., Escobar-Morales, D., Quiroz-Quintero, M., Guzmán, N. C., Martínez-Galán, J. P., & Sepúlveda-Herrera, D. M. Consumo de tartrazina en estudiantes de Nutrición y Dietética de la Universidad de Antioquia, sede Medellín, 2022.

Arroyave Rojas, J. A., Garcés Giraldo, L. F., Arango Ruiz, Á. D. J., & Agudelo López, C. M. (2008). La tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(1), 20-27.

Archives of Disease in Childhood. (2008). Food additives and hyperactivity. *Archives of Disease in Childhood*, 1.

Sarmiento Morales, D., & Morales Ballesteros, H. S. (2021). *Efectos causados en la salud por el uso de colorante tartrazina y el edulcorante ciclamato de sodio en la industria alimentaria y su relación con la bioética*.

- Fathy, H. E.-D. M. (2012). Toxic effects of some synthetic food colorants and/or flavor additives on male rats. *Toxicology and Industrial Health*, 9.
- Sekeroglu, Z., & Gallicchio, B. (2017). Effects of tartrazine on proliferation and genetic damage in human lymphocytes. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 7.
- Walaa, M., & Mohamed, A. (2019). Effect of tartrazine on gastric mucosa and the possible role of recovery with or without riboflavin in adult male albino rat. *Department of Histology and Cell Biology, Faculty of Medicine, Tanta University*, 15.
- El estudio de Khayyat (2017) analizó el impacto de la tartrazina en hígado, riñón y ADN de ratas Wistar, concluyendo que puede causar daño genético y estrés oxidativo.
- Mohamed, H., & Youssef, E. (2019). Embryotoxic and Teratogenic Effects of Tartrazine in Rats. *Toxicological Research*, 7.
- Matayoshi, S., & M. (2017). Efecto de la tartracina sobre el tejido cerebral y función cognitiva en ratas de segunda generación. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 54.
- Rafati, A., & N. N. (2017). Using vitamin E to prevent the impairment in behavioral test, cell loss and dendrite changes in medial prefrontal cortex induced by tartrazine in rats. *Acta Histochemica*, 9.
- Sayema, A., & M. H. (2017). Tartrazine induced changes in physiological and biochemical parameters in Swiss albino mice, *Mus musculus*. *Marmara Pharmaceutical Journal*, 7.
- Madeha, A., & H. E. (2018). Nigella sativa oil protects against tartrazine toxicity in male rats. *Toxicology Reports*, 10.
- Salto, C. S., Chuquer S, D. C., Pazmiño V, K. P., Fernández M., L. F., & Pilaquinga F., F. P. (2019). *REMOCIÓN DE TARTRAZINA EN AGUAUSANDO NANOPARTÍCULAS DE HIERRO CEROVALENTES* [Tesis]. infoANALÍTICA.