

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX/TESIS

Análisis del efecto de agentes oxidantes y radiación UV en la degradación de naranja de metileno y estudio preliminar de la oxidación de colorantes grado reactivo y analítico

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

PRESENTA

Omar Flores Ortega

DIRECTORA:

Dra. Bethsabet Jaramillo Sierra

Octubre 2024

Agradecimientos

A mis padres por todo el esfuerzo y dedicación para poder brindarme los medios necesarios, instrumentos, motivación y la educación para poder formarme como persona y profesionalista en esta institución, además de todo su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años.

A mis amigos por acompañarme en esta travesía durante todos los semestres de la carrera, por demostrar que su amistad no solo la encuentro en los momentos buenos, pues principalmente estuvieron ahí en los momentos difíciles y complicados.

A mis maestros por brindarme de su sabiduría y conocimientos para formarme como estudiante, profesionalista y un ingeniero íntegro, por sus consejos y apoyo cuando fueron solicitados, así como oportunidades de desarrollar los conocimientos aprendidos en clases, aulas y laboratorios mediante trabajos y proyectos de la vida diaria.

A la Dra. Alma Neli Hernández Arias, docente que desde el servicio social me permitió integrarme a su equipo de trabajo de investigación y así mismo continuar desarrollando conocimiento y proyectos en esta rama, del mismo modo agradezco la oportunidad y confianza de permitirme formar parte del equipo de trabajo en FECIEM fungiendo el cargo de líder en dicho equipo de trabajo.

A la Dra. Bethsabet Jaramillo Sierra, docente que durante toda la etapa de residencia profesional y ahora el presente trabajo de tesis me permitió trabajar con ella y su equipo de trabajo en el presente proyecto para así lograr el objetivo del título profesional y su confianza depositada en mi para llevar a cabo tareas, uso de equipo y manejo de instrumentos de laboratorio.

Índice

	Pág.
Agradecimientos	1
Resumen/Abstract	12
Introducción	14
Planteamiento del Problema	16
Justificación	17
Hipótesis	18
Objetivos del Proyecto	18
Capítulo 1. Marco Teórico	
1. Agua	20
1.1. Características	20
1.1.1. Características Químicas	20
1.1.2. Características Físicas	20
1.1.3. Características Biológicas	20
1.2. Distribución e importancia del agua	21

1.3. Problemática del Agua	21
2. Contaminación del agua	22
2.1. Contaminantes Emergentes	22
2.1.1. Clasificación de los contaminantes emergentes	22
3. Colorantes	25
3.1. Colorante naranja de metileno	25
3.1.1. Aplicaciones	26
3.1.2. Efectos Adversos	26
4. Procesos de Oxidación Avanzada	28
4.1. Ventajas y Desventajas	29
4.2. Combinación de POA's	30
4.2.1. O_3/H_2O_2	30
4.2.2. O_3/UV	30
4.2.3. UV/H_2O_2	30
4.3. Sistemas Simples	31
4.4. Sistemas Combinados	31

5. Reactor	32
5.1. Tipos de reactores	32
5.1.1. Reactor tipo CSTR	32
5.1.2. Reactor tipo PFR	33
5.1.3. Reactor tipo <i>Batch</i>	33
5.2. Características	33
6. Estado del arte	34
Capítulo 2. Metodología	
2. Metodología Global	39
2.1. Instrumentos y reactivos utilizados	40
2.2. Dispositivo experimental y metodología	44
2.2.1. Preparación de la muestra	44
2.2.2. Identificación de colorante	44
2.2.3. Reactor de tratamiento	45
2.2.4. Metodología experimental	46
2.2.5. Experimentos desarrollados	46

Capítulo 3. Resultados

3.1. Descripción general del capítulo	51
3.2. Resultados de la degradación de naranja de metileno	51
3.2.1. Curva de calibración y determinación de eficiencia de degradación	51
3.3. Resultados en % de degradación de la combinación de agentes oxidantes y reactivos por experimento	53
3.3.1. Ozono O ₃	53
3.3.2. Peróxido de Hidrogeno H ₂ O ₂	55
3.3.3. Comparación de Ozono O ₃ , Peróxido de Hidrogeno H ₂ O ₂ y Radiación Ultravioleta UV	57
3.3.4. Combinación de los métodos Ozono O ₃ y Peróxido de Hidrogeno H ₂ O ₂	59
3.3.5. Combinación de los métodos Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H ₂ O ₂	61
3.3.6. Combinación de los métodos Ozono O ₃ , Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H ₂ O ₂	63

3.3.7. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.5g), Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2	65
3.3.8. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.25g), Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2	67
3.3.9. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.5g), Ozono O_3 , Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2	69
3.3.10. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.25g), Ozono O_3 , Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2	71
3.3.11. Figuras extras donde se muestran las pruebas realizadas	72
Conclusiones y recomendaciones	79
Fuentes de Información	80

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura química del colorante naranja de metileno	26
Figura 2. Proceso global del proceso experimental	39

Figura 3. Determinación de la máxima longitud de onda del naranja de metileno	44
Figura 4. Reactor de tratamiento	45
Figura 5. Regresión de mínimos cuadrados	52
Figura 6. Comparación de experimentos de dosis de O_3	54
Figura 7. Comparación de experimentos de dosis de H_2O_2	56
Figura 8. Comparación de experimentos de cada agente oxidante	57
Figura 9. Comparación de combinación de experimentos O_3/H_2O_2 con variación en dosis de H_2O_2	59
Figura 10. Comparación de combinación de experimentos UV/ H_2O_2 con variación en dosis de H_2O_2	61
Figura 11. Comparación de combinación de experimentos $O_3/UV/H_2O_2$ con variación en dosis de H_2O_2	63
Figura 12. Comparación de combinación de experimentos $TiO_2(0.5g)/UV/H_2O_2$ con variación en dosis de H_2O_2	65
Figura 13. Comparación de combinación de experimentos $TiO_2(0.25g)/UV/H_2O_2$ con variación en dosis de H_2O_2	67
Figura 14. Comparación de combinación de experimentos $TiO_2(0.5g)/O_3/UV/H_2O_2$ con variación en dosis de H_2O_2	69
Figura 15. Comparación de combinación de experimentos $TiO_2(0.25g)/O_3/UV/H_2O_2$ con variación en dosis de H_2O_2	71

Figura 16 . Pruebas individuales e inicio de pruebas con 2 agentes oxidantes	72
Figura 17. Pruebas con 2 o más agentes oxidantes	73
Figura 18. Pruebas con 3 o más agentes oxidantes	73
Figura 19. Pruebas a cada colorante grado reactivo y analítico con O ₃ a dosis de 400mg/h	73
Figura 20. Total de pruebas realizadas (37 pruebas) durante este trabajo de investigación	74
Figura 21. Representación del % de degradación del colorante naranja de metileno en comparación con la concentración	76
Figura 22. Representación del % de degradación del colorante naranja de metileno con relación al tiempo de tratamiento	77
Figura 23. Representación de muestras de tratamiento con O ₃ a dosis de 400mg/h al cabo de 60 minutos	78
Figura 24. Representación de muestras de Tartrazina en tratamiento con O ₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 60 minutos	83
Figura 25. Representación de muestras de Cristal Violeta en tratamiento con O ₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 60 minutos	84
Figura 26. Representación de muestras de colorante analítico Caballito Café Tabaco en tratamiento con O ₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 20 minutos	85
Figura 27. Representación de muestras de colorante analítico Caballito Rojo Granada en tratamiento con O ₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 30 minutos	86

Figura 28. Representación de muestras de colorante analítico Caballito Negro Mezclilla en tratamiento con O₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 60 minutos. 87

Índice de Tablas

Tabla 1. Características y datos de seguridad del colorante naranja de metileno	27
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los POA's	29
Tabla 3. Instrumentos utilizados en el desarrollo experimental	40
Tabla 4. Combinación de agentes oxidantes y reactivos por experimento	47
Tabla 5. Datos obtenidos para la curva de calibración	52
Tabla 6. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método O ₃ a diferentes dosis en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	53
Tabla 7. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método H ₂ O ₂ a diferentes dosis en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	55
Tabla 8. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno comparando cada agente oxidante O ₃ /H ₂ O ₂ y UV en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	57
Tabla 9. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método O ₃ /H ₂ O ₂ en variación de dosis de H ₂ O ₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	59

Tabla 10. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método UV/H ₂ O ₂ en variación de dosis de H ₂ O ₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	61
Tabla 11. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método O ₃ /UV/H ₂ O ₂ en variación de dosis de H ₂ O ₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	63
Tabla 12. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método TiO ₂ (0.5g)/UV/H ₂ O ₂ en variación de dosis de H ₂ O ₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	65
Tabla 13. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método TiO ₂ (0.25g)/UV/H ₂ O ₂ en variación de dosis de H ₂ O ₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	67
Tabla 14. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método TiO ₂ (0.5g)/O ₃ /UV/H ₂ O ₂ en variación de dosis de H ₂ O ₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	69
Tabla 15. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método TiO ₂ (0.25g)/O ₃ /UV/H ₂ O ₂ en variación de dosis de H ₂ O ₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos	71
Tabla 16. Datos de experimento O ₃ con dosis de 400mg/h en reactor tipo <i>Batch</i> por tiempo de reacción de 60 minutos	75
Tabla 17. Datos de experimento O ₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo <i>Batch</i> por tiempo de reacción de 60 minutos a colorante Tartrazina.	82
Tabla 18. Datos de experimento O ₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo <i>Batch</i> por tiempo de reacción de 60 minutos a colorante Cristal Violeta.	84

Tabla 19. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 20 minutos a colorante analítico Caballito Café Tabaco. 85

Tabla 20. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 30 minutos a colorante analítico Caballito Rojo Granada. 86

Tabla 21. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 60 minutos a colorante analítico Caballito Negro Mezclilla. 87

Resumen

Se estima que aproximadamente 2 millones de toneladas de aguas residuales, desechos industriales y agrícolas son vertidos en las diferentes masas de agua. Por otra parte, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que la cantidad de agua residual producida anualmente es de 1500 km³, lo cual es seis veces más que el total de agua contenida en todos los ríos del mundo.

Una posible solución a esta problemática son los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's). Estas tecnologías se caracterizan por generar diferentes especies radicales, especialmente el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), el cual puede oxidar con excelente desempeño diferentes moléculas.

En el presente trabajo se estudió la aplicación de los procesos de oxidación avanzada, específicamente; $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{TiO}_2$ modificando las variables de control para evaluar su efecto en la degradación del colorante naranja de metilo en solución acuosa, para ello se analizó el efecto de la concentración inicial de colorante, el pH de la solución, concentración de H_2O_2 con relación al tiempo de tratamiento (1 hora), y exposición a la luz UV.

Palabras Clave: colorante, combinación, concentración, espectrofotómetro, degradación, oxidación, POA's, radical, residual, solución.

Abstract

It is estimated that approximately 2 million tons of wastewater, industrial and agricultural wastes are discharged into different bodies of water. In addition, the United Nations (UN) estimates that the amount of wastewater produced annually is 1500 km³, which is six times more than the total amount of water contained in all the rivers of the world.

One possible solution to this problem is advanced oxidation processes (AOP's). These technologies are characterized by the generation of different radical species, especially the hydroxyl radical ($\bullet\text{OH}$), which can oxidize different molecules with excellent performance.

In the present work, the degradation of the advanced oxidation processes $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{TiO}_2$ was studied by modifying the control variables to evaluate its effect on the methyl orange dye in a contaminated aqueous solution. The effect of the initial dye concentration, pH of the solution, H_2O_2 concentration over time (1 hour), agitation and exposure to UV light.

Key words: dye, combination, concentration, spectrophotometer, degradation, oxidation, POA's, radical, residual, solution.

Introducción

En los últimos años, ha aumentado la preocupación entre los gestores y administradores de abastecimiento de aguas, como consecuencia de la aparición de numerosos estudios que alertan sobre la presencia de colorantes en los sistemas acuáticos naturales. Una vez administrado el colorante, las moléculas son absorbidas, distribuidas y metabolizadas por los organismos para ser excretadas. La excreción, junto con los vertidos incontrolados de colorantes, y eliminación de los excedentes provenientes de los hogares y aplicaciones industriales, son las principales vías por las cuales son conducidos hasta las estaciones de tratamiento de aguas residuales. Las plantas de tratamiento de aguas residuales no son capaces de retirar estos productos, ya que se han detectado en el agua potable lo que puede generar riesgos para la salud pública en un futuro.

Los procesos basados en la oxidación de compuestos orgánicos mediante la generación de radicales hidroxilos son muy reactivos y reciben el nombre de Procesos de Oxidación Avanzada (POA's). El tratamiento de efluentes por estos métodos tiene por objetivo degradar o reducir la concentración de contaminantes complejos, mitigando la naturaleza peligrosa de los residuos acuosos, o en su caso, modificar ciertos contaminantes, de tal forma que puedan ser posteriormente tratados por otros procesos. Las tecnologías conocidas como Procesos de Oxidación Avanzada fueron desarrollados para dar respuesta al tratamiento de efluentes líquidos que no pueden ser tratados por tecnologías convencionales. La dificultad de tratar estos efluentes por vía convencional puede derivar de la presencia de elevadas cargas orgánicas, la presencia de compuestos recalcitrantes, tóxicos y/o inhibidores, así como de un mayor grado de exigencia ambiental para ciertos parámetros de vertido que obligue esencialmente a una eliminación total de determinados contaminantes. La obtención de estos radicales en disoluciones acuosas puede ser lograda por la combinación de agentes oxidantes y/o radiación natural o artificial, como, por ejemplo: $O_3/H_2O_2/UV/TiO_2$.

Muchos compuestos tóxicos, los cuales pueden estar presentes en el agua y las aguas residuales son removidos por oxidación química. Este trabajo tiene el objetivo de evaluar el efecto del uso de uno de estos agentes oxidantes o la mezcla de estos mismos en una solución acuosa contaminada de un colorante (naranja de metileno),

mediante diversos Procesos de Oxidación Avanzada ($O_3/H_2O_2/UV/TiO_2$), utilizando un reactor tipo *Batch* con el objetivo de lograr un mayor aprovechamiento de estos procesos, ya que la muestra tendrá un mayor contacto, asegurando una degradación eficiente del colorante naranja de metileno.

En el presente trabajo de investigación, dicha información se encuentra dividida en 3 capítulos, adicional un apartado único de conclusiones y anexos, en el Capítulo 1 se describen las generalidades del trabajo, información necesaria para la comprensión de los métodos utilizados, el proceso empleado, etc. En capítulo 2 se describe la metodología utilizada durante el proceso de experimentación con el colorante naranja de metileno, del mismo modo los materiales, reactivos y equipos utilizados durante el proceso. En el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos durante el proceso de experimentación, expresados mediante gráficas, tablas e imagen(es) representativas para la interpretación de los resultados.

Planteamiento del Problema

El agua es el recurso natural más importante para la vida y/o supervivencia de todos los seres vivos, actualmente, se ha visto limitada por la amplia gama de contaminantes que se encuentran desde plaguicidas, metales pesados, pesticidas y los ahora contaminantes emergentes que engloban fármacos, colorantes, productos de higiene etc. En los últimos años, los contaminantes que más se han detectado son los denominados contaminantes emergentes que provienen de procesos industriales como el: alimenticio, médico, textil, entre otros; este tipo de contaminantes se caracterizan por poseer estructuras moleculares complejas con diversos grupos funcionales y su origen es sintético.

Ejemplo de ello tenemos el colorante naranja de metileno, este colorante tiene diversas aplicaciones, entre ellas se pueden citar: análisis de sustancias químicas y farmacéuticas, especialmente en la titulación de ácidos y también como colorante en productos textiles en un 5% y tejidos biológicos. Dicho colorante es tóxico, por tanto, debe evitarse el contacto directo con piel, mucosas, ojos y zonas expuestas. En todos los casos mencionados tiene efecto irritante, pudiendo enrojecer la zona afectada y en altas concentraciones podría generar daños considerables al individuo, por ello es recomendable acudir al médico en caso de ser expuesto a altas dosis de este colorante. (Assis, Pastre & Silva, 2019).

La disposición final de estos contaminantes no está regulada por ninguna dependencia, por lo que es muy común encontrarlos en cuerpos de agua, generando un problema alarmante en la flora y fauna, cabe mencionar, que en plantas de tratamiento de agua no existe etapa alguna para la eliminación de este tipo de contaminantes ya que antes no era considerado para su remoción y/o eliminación, aumentando más esta problemática. (Lizarazo & Orduz, 2016).

Justificación

Las Tecnologías Avanzadas o mejor conocidos como Procesos de Oxidación Avanzada son una alternativa para la eliminación de contaminantes emergentes presentes en agua, los cuales se basan en la generación de especies activas que poseen alto poder oxidativo que al colisionar con el contaminante logra su degradación y en algunos casos la mineralización. En este proyecto se evalúa la factibilidad de aplicar diversos procesos de tratamiento (POA's) en la degradación de naranja de metileno, por lo cual se estudiará el efecto de variables como: concentración inicial de agentes oxidantes, concentración de la solución, tiempo y la potencia de la fuente de energía, mineralización y variación de la coloración, para determinar las mejores condiciones para el tratamiento.

Existen diferentes alternativas de estudio para la degradación de colorantes, ejemplo de ellos son: películas delgadas de seleniuro de zinc (ZnSe) modificadas con iones Fe^{2+} y Cu^{2+} , usando como reactivo ZnSO_4 , resinas de intercambio iónico en solución acuosa de sal inorgánica, adsorción con Carbón Activado mediante interacciones electrostáticas que se generan entre la superficie del adsorbente y el colorante, fotocátalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2) empleando un reactor fotocatalítico y disoluciones de orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina, entre otras alternativas de tratamiento.

Los Procesos de Oxidación Avanzada son capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical $\bullet\text{OH}$. La generación de estos radicales se realiza a partir de O_3 , H_2O_2 y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales. Por ello se eligieron los POA's pues permiten un mayor control sobre lo que ocurre durante el proceso de degradación del colorante, el acondicionamiento de equipos no requiere ser complejo, la preparación de la muestra es inmediata, los subproductos generados no requieren de otro proceso o uso de equipos adicionales para su separación o sustracción de la muestra durante el proceso.

Hipótesis

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) al ser empleados individualmente pueden tener un efecto de degradación mínimo en agentes contaminantes como el naranja de metileno, pero que al combinarse unos con otros (O_3 , H_2O_2 , UV, TiO_2) en diferentes concentraciones y con radiación UV pueden proveer de una mayor degradación del contaminante en un determinado tiempo, brindando así condiciones óptimas en la degradación del contaminante.

Objetivos del Proyecto

General:

- Degradar el colorante naranja de metileno utilizando diversos Procesos de Oxidación Avanzada, determinando los parámetros óptimos relativos a la eficiencia de degradación.

Específicos:

- Acondicionar el reactor de tratamiento óptimo para el desarrollo experimental.
- Efectuar experimentos preliminares para establecer los parámetros de estudio.
- Evaluar el efecto de diversos agentes oxidantes (ozono, peróxido de hidrógeno y óxidos de titanio), así como radiación ultravioleta y su efecto sinérgico en la degradación del colorante.
- Analizar cualitativamente el cambio de coloración de las muestras, antes y durante el tratamiento, asociado con la generación de subproductos.
- Determinar la variación de la concentración del peróxido de hidrógeno con relación al tiempo de tratamiento.
- Medir el cambio de pH en función al tiempo.
- Comparar la degradación del colorante naranja de metileno con otros colorantes grado reactivo y comerciales.

Capítulo 1

Generalidades

1. Agua

1.1. Características.

El agua es una sustancia importante para la vida humana; es una molécula formada por tres átomos, uno de oxígeno y dos de hidrógeno, con enlaces polares que permiten establecer puentes de hidrógeno entre moléculas adyacentes. Este enlace tiene una gran importancia porque confiere al agua propiedades que corresponden con su masa molecular. De ahí se genera su elevado punto de fusión y ebullición, imprescindibles para que el agua se encuentre en estado líquido. El ciclo hidrológico y el balance de agua global son la base principal para lograr entender el sistema hídrico atmosférico, el cual es un enlace vital para la circulación y transformación a través del planeta (Alarcón & Ramírez, 2021).

1.1.1. Características químicas.

Existen múltiples compuestos químicos disueltos en el agua que pueden ser de origen natural o industrial y serán benéficos o dañinos de acuerdo con la composición y concentración presentes en el agua. Algunos elementos químicos que se encuentran en el agua natural pueden producir alcalinidad, dureza y salinidad en la misma (Alarcón & Ramírez, 2021).

1.1.2. Características físicas.

Se refiere al sabor, olor, color y la turbidez del agua. El sabor y olor se debe a la presencia de sustancias químicas volátiles y a la materia orgánica en descomposición y el color del agua se debe a la presencia de minerales como hierro y manganeso, materia orgánica y residuos coloridos de las industrias. La turbidez puede contener agentes patógenos adheridos a las partículas en suspensión. Las mediciones de estos mismos se hacen en base de una dilución necesaria para reducirlos a un nivel poco detectable por el ojo humano.

1.1.3. Características biológicas.

El agua posee en su composición una gran variedad de elementos biológicos, empezando desde los microorganismos hasta los peces. El origen de los microorganismos se constituye por su hábitat natural, pero también pueden provenir de contaminación por vertidos cloacales y/o industriales, como también por arrastre de los existentes en el suelo por acción de la lluvia. La calidad y

cantidad de microorganismos va acompañando de las características físicas y químicas del agua, ya que cuando el agua tiene temperaturas templadas y materia orgánica disponible, la población crece y se diversifica. (Alarcón & Ramírez, 2021)

1.2. Distribución e importancia del agua.

El agua cubre aproximadamente el 75% de la superficie de la tierra y se estima que su área de distribución cubre 510 millones de km². El volumen total de agua en el planeta es de aproximadamente 1400 millones de km³ de los cuales solo el 2.5% corresponden al agua dulce o alrededor de 35 millones de km³ (Lizarazo & Orduz, 2016).

La mayor parte del agua dulce se encuentra en glaciares y la nieve de los polos alrededor del 68%, mientras el 30% está en el suelo en profundos acuíferos de aguas subterráneas. Las principales fuentes de agua para uso humano son los lagos, ríos la parte aprovechable es aproximadamente de solo 200,000 km³ de agua, menos del 1% del total de agua dulce y solo el 0.01% de toda agua del planeta (Lizarazo & Orduz, 2016).

La disponibilidad de agua es de suma importancia para la vida y el desenvolvimiento económico de cualquier región del mundo. Los recursos disponibles deben repartirse entre numerosos usuarios además de tener en cuenta las necesidades del medio ambiente. El agua es usada para muchas finalidades y en cada caso se requiere una calidad particular, siendo importante no utilizar agua de calidad superior para un uso que no lo requiera (Lizarazo & Orduz, 2016).

1.3. Problemática del agua.

El agua es un recurso natural indispensable para la vida humana y el sostenimiento del medio ambiente; a consecuencia del rápido desarrollo humano y económico y del uso inadecuado que se ha hecho de ella como medio de eliminación, ha sufrido alteraciones en su composición original. Durante décadas, toneladas de sustancias biológicamente activas, sintetizadas para su uso en la agricultura, la industria, la medicina, etc., han sido vertidas al medio ambiente sin reparar en las posibles consecuencias. Al problema de la contaminación, que comenzó a hacerse notable ya a principios del siglo XIX, se debe de añadir el

problema de la escasez, aspecto éste que está adquiriendo proporciones alarmantes a causa del cambio climático y la creciente desertización que está sufriendo el planeta (Lizarazo & Orduz, 2016) .

2. Contaminación del agua.

La calidad del agua se ve afectada por la contaminación ocasionada por microorganismos, trazas de metales, compuestos químicos tóxicos, cambios en la acidez, temperatura o salinidad. Las actividades industriales dan lugar a descargas en las aguas de alrededor de 300-400 millones de toneladas de metales pesados, disolventes, fangos tóxicos y otros residuos cada año. En los últimos años se ha podido observar un aumento en la preocupación por la contaminación de las aguas en el mundo. Los elementos claves para la prevención, control y reducción de la descarga de sustancias peligrosas, nutrientes y otros contaminantes reside en el control de la contaminación desde la fuente y en la legislación sobre emisiones de aguas residuales por parte de las autoridades competentes (Alarcón & Ramírez, 2021).

2.1. Contaminantes emergentes.

Son compuestos de distinto origen y naturaleza química, cuya presencia y consecuencias en el medio ambiente han pasado inadvertidas. Están presentes en aguas en bajas concentraciones, y son considerados muy perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente, ya que pueden causar diversos efectos en los organismos. Se consideran emergentes debido a que no se encuentran aún regulados, o están siendo sometidos a un proceso de regulación (Lizarazo & Orduz, 2016).

2.1.1 Clasificación de los contaminantes emergentes.

Dentro de los contaminantes emergentes se encuentran gran variedad de productos de diverso origen y naturaleza química, derivados tanto del uso personal como de diversas industrias, los cuales se exponen a continuación:

a) Pesticidas polares.

Son productos orgánicos de carácter antropogénico, los cuales representan un elevado peligro para la salud de las personas, la flora y fauna, y el medio ambiente. Aunque los pesticidas se regularon hace

décadas, el problema radica en sus productos de degradación- la mayoría de ellos polares-, prácticamente ignorados hasta la actualidad, pero que pueden resultar más tóxicos incluso que los productos de partida. Estos compuestos se emplean para el control de plagas tanto en agricultura como en industria, clasificándose en: herbicidas (hierbas), insecticidas (insectos), fungicidas (hongos y mohos), rodenticidas (roedores), molusquicidas (moluscos). La estructura química de los pesticidas es muy diversa, siendo los grupos más importantes las siguientes: (Lizarazo & Orduz, 2016).

- ❖ Carbamatos: eficaces herbicidas, insecticidas y fungicidas, son altamente biodegradables. El carbaril y la carbenzima son de los más empleados.
- ❖ Cloroacetanilidas: *pre*-herbicidas para controlar la proliferación de la maleza. El metaloclor fue uno de los primeros pesticidas que se detectó en las aguas subterráneas y superficiales.
- ❖ Clorofenoxiácidos: herbicidas para uso agrícola, en las actividades forestales y de control de la maleza, tienden a absorberse en el suelo. Ejemplos más comunes de este tipo de compuestos son bentazona y triclopyr.
- ❖ Organoclorados: insecticidas agrícolas, altamente persistentes en el medio ambiente, son hidrófobos, tienen muy baja solubilidad y son conocidos por su alta toxicidad. Los compuestos de este tipo que se encuentran más frecuentemente en el agua son el *1,1,1-tricloro-2,2-bis(4-clorofenil) etano* (DDT), la dieldrina, el lindano y el metoxicloro.
- ❖ Organofosforados: insecticidas que actúan como neurotóxicos.
- ❖ Piretroide: insecticidas, son hidrofóbicos y pueden ser persistentes en el medioambiente.
- ❖ Triazinas: herbicidas selectivos. Algunos ejemplos de triazinas son la cianazina, la atrazina, y la simazina, estos dos últimos son persistentes y solubles en agua (Lizarazo & Orduz, 2016).

b) Retardantes de llama bromados.

Son compuestos empleados como aditivos o reactivos en una amplia variedad de polímeros como espumas de poliestireno, poliestireno de elevado impacto y resinas de epoxy; también se utilizan en una gran variedad de productos de

consumo, como pueden ser el material electrónico y los materiales de construcción (Alarcón & Ramírez, 2021).

Surfactantes: Comprende residuos de agentes tenso activos aniónicos del tipo sulfonato alquibenceno lineal (LAS) y no aniónicos del tipo alquifenolpolietoxilado (APEO). Estos se usan como detergentes, agentes adherentes, dispersantes, emulsificantes, solubilizantes y agentes espumantes, además de que algunos son empleados en el hogar, la mayoría de ellos tienen uso en la industria (Alarcón & Ramírez, 2021).

- ❖ Drogas ilícitas: Las drogas ilícitas y sus metabolitos son un grupo importante de contaminantes emergentes, entre los contaminantes de drogas presentes en aguas residuales están las anfetaminas, la cocaína, metanfetamina, heroína, morfina y sus metabolitos benzoilecgonina, norcocaína.
- ❖ Cuidado personal: Los productos de cuidado personal que hacen parte de los contaminantes emergentes son: perfumes, fragancias, desodorantes, maquillaje, agentes de protección solar, repelentes de insectos, entre otros.

Los compuestos que son liberados en las aguas y que pueden afectar a los organismos vivos en ciertas concentraciones son, el *DEET-N- dietil- meta-toluamida*, ingrediente activo más común en los repelentes de insectos, también están los parabenos-ésteres de alquilo *p*-hidroxibenzoico, utilizados como bacteriostáticos y fungistáticos en cosméticos, también se han encontrado en aguas residuales algunos agentes antifúngicos como el triclosán presente en dentífricos, se encuentran los compuestos presentes en productos de higiene personal como almizcles policíclicos, tonalide y galaxolide que son fragancias (Alarcón & Ramírez, 2021).

c) Productos farmacéuticos

Los fármacos son los contaminantes emergentes que más interés han suscitado y han sido objeto de estudios más exhaustivos, debido a sus propiedades físico-químicas y a las características de los suelos, estas sustancias pueden alcanzar aguas subterráneas, contaminando los acuíferos o permanecer retenidas en los suelos. El control de los productos farmacéuticos es muy complejo; su origen no radica en las industrias dedicadas a su producción, que se encuentran

perfectamente reguladas y controladas, si no, en el uso por parte de las personas, que vierten constantemente fármacos y restos de estos, haciendo que sea algo casi imposible de controlar (Assis, Pastre & Silva, 2019).

3. Colorantes

Un colorante es un compuesto orgánico que al aplicarlo a un sustrato (generalmente una fibra textil pero también a cuero, papel, plástico o alimento) le confiere un color más o menos permanente. Un colorante se aplica en disolución o emulsión y el sustrato debe tener cierta afinidad para absorberlo. Los colorantes en general son solubles en el medio en el que se aplican o en el producto final. La producción mundial de colorantes es del orden de 90 millones de kg al año (Berber, Bernal, Delgado, Espinosa, Hernández & Martínez, 2017).

Un pigmento, por el contrario, es una sustancia coloreada e insoluble que se dispersa en un medio adecuado para su uso. Se emplean principalmente para colorear plásticos y para pinturas y tintas de imprenta.

Las sustancias coloreadas son las que absorben luz en la región visible del espectro (380 a 750 nm). Una sustancia presenta el color complementario del que absorbe ya que este se resta de la luz reflejada o transmitida. Las sustancias que no absorben luz visible son blancas o incoloras, y las que absorben todas las longitudes de onda son negras (Berber, Bernal, Delgado, Espinosa, Hernández & Martínez, 2017).

Estos compuestos se diseñan para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana, por lo que son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencionales, para lo cual se deben aplicar otros procesos o combinación de procesos para de esta manera ser eficientes en la degradación de estos agentes contaminantes. (Berber, Bernal, Delgado, Espinosa, Hernández & Martínez, 2017).

3.1. Colorante Naranja de Metileno.

El naranja de metileno es un indicador de pH (Figura 1) tiene un estado físico-sólido y puede disolverse en agua para formar una solución acuosa, además es un compuesto químico azoderivado con características de ácido débil, el cual

cambia de color de rojo a naranja-amarillo entre pH 3.1 y 4.4. El nombre del compuesto químico del colorante es sal sódica de ácido sulfónico de 4-*Dimetilaminoazobenceno*. La fórmula molecular de esta sal sódica es $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$ y su peso molecular es de 327.34 g/mol (Assis, Pastre & Silva, 2019).

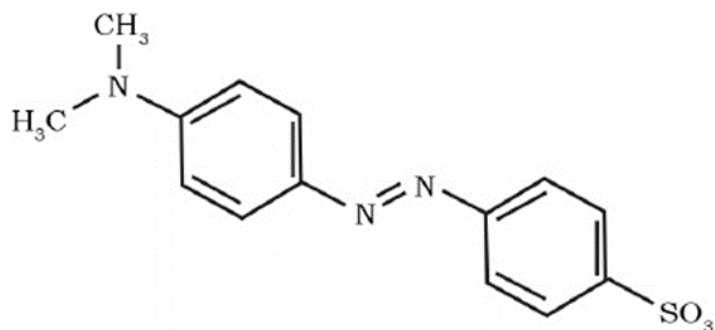


Figura 1. Estructura química del colorante naranja de metileno.

3.1.1. Aplicaciones

Este colorante azoderivado tiene diversas aplicaciones. Entre ellas se pueden citar: análisis de sustancias químicas y farmacéuticas, especialmente en la titulación de ácidos y también como colorante en productos textiles en un 5% y tejidos biológicos (Assis, Pastre & Silva, 2019).

3.1.2. Efectos adversos

El colorante naranja de metileno es tóxico, por tanto, debe evitarse el contacto directo con piel, mucosas, ojos y zonas expuestas. En todos los casos mencionados tiene un efecto irritante, pudiendo enrojecer la zona afectada y en altas concentraciones podría generar daños considerables al individuo por ello es recomendable acudir al médico en caso de ser expuesto a altas dosis de este colorante (Assis, Pastre & Silva, 2019).

En la Tabla 1 se muestran algunas características y datos de seguridad sobre el colorante naranja de metileno (Assis, Pastre & Silva, 2019) (Berber, Bernal, Delgado, Espinosa, Hernández & Martínez, 2017).

Tabla 1. Características y datos de seguridad del colorante naranja de metileno (Castellanos, Cortez, Gómez & Rodríguez, 2021).

Nombre del compuesto	Naranja de Metileno
Nombre Químico	<i>4-Dimetilaminoazobenceno</i>
Forma Molecular	C ₁₄ H ₁₄ N ₃ NaO ₃ S
Peso Molecular	327.34 g/mol
Peligro para la salud	Toxicidad aguda oral
Peligro para el medio ambiente	Se necesita de una pequeña cantidad en gramos para contaminar miles de litros de agua.
Indicaciones de Peligro	Tóxico en caso de ingestión
Primeros Auxilios	Contacto con los ojos Enjuagar inmediatamente con abundante agua, también bajo los párpados, durante al menos 15 minutos. Consultar a un médico.
	Contacto con la piel Lavar inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos. Consultar a un médico si se producen síntomas.
	Ingestión No provocar el vómito. Llamar inmediatamente a un médico o a un centro de información toxicológica.

	Inhalación Transportar a la víctima al exterior. Si la respiración es difícil, proporcionar oxígeno. No utilizar el método boca a boca si la víctima ha ingerido o inhalado la sustancia; administrar la respiración artificial con ayuda de una mascarilla de bolsillo dotada de una válvula unidireccional u otro dispositivo médico para reanimación respiratoria apropiado. Consultar a un médico.
Medidas Técnicas	Asegurar una ventilación apropiada en áreas confinadas. Verificar la existencia de estaciones de lavado de ojos y/o duchas cerca del área de trabajo para la remoción de agentes químicos que pudieran tener contacto con ojos y piel. De ser necesario se debe contar con medidas de aislamiento o confinamiento, uso y mantenimiento de equipos o sistemas de ventilación que permitan el menor contacto y esparcimiento de materiales y/o sustancias peligrosas.

4. Procesos de Oxidación Avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada o POA's son capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical $\bullet\text{OH}$. La generación de estos radicales se realiza a partir de O_3 , H_2O_2 y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono.

Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelos (Castellanos, Cortez, Gómez & Rodríguez, 2021).

Los POA's se pueden clasificar de diversas formas, entre ellas se destacan los procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos en función de la participación de la luz ultravioleta en el proceso (Castellanos, Cortez, Gómez & Rodríguez, 2021).

4.1. Ventajas y desventajas

En tabla 2 se presentan algunas ventajas con las que cuentan los Procesos de Oxidación Avanzada y a su vez, las desventajas que pueden presentar al aplicarlos (Deza, Manrique & Osorio, 2017).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los POA's

Ventajas	Desventajas
No sólo cambian la fase del contaminante, sino que lo transforman químicamente.	Elevado costo, especialmente cuando se habla de ozono y luz ultravioleta.
Consiguen la mineralización completa del contaminante.	Pueden formar subproductos de reacciones indeseables en algunos casos.
No generan lodos, por lo cual no se requiere de un proceso de tratamiento y/o disposición.	En algunos casos, necesitan tiempos de reacción elevados.
Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes, medicamentos y oxidantes residuales.	Es necesaria la mano de obra especializada.
Son muy útiles para contaminantes que resisten otros métodos de tratamiento.	
Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.	

4.2. Combinación de POA's.

Con el paso de los tiempos, el uso de los Procesos de Oxidación Avanzada ha sido tan eficaces que se han realizado la combinación de procesos con el fin de obtener mejores resultados. Sin embargo, la eficiencia de estos dependerá de los funcionamientos y condiciones del efluente.

A continuación, se describirán algunos de los principales sistemas combinados:

4.2.1 O₃/H₂O₂

Es un tratamiento muy efectivo para el *post*-tratamiento, se basa en la combinación de la oxidación directa y selectiva del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales •OH. Con el fin de aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, produciendo una destrucción adicional de la carga orgánica. Generalmente la ozonización se realiza en medio alcalino para aumentar la velocidad de descomposición del ozono, incrementando así la velocidad de generación de radicales •OH. Cabe destacar que su principal ventaja al aumentar la velocidad de descomposición del ozono es ocasionar una destrucción adicional, incluso en condiciones muy bajas de concentraciones del contaminante, sin embargo, es un proceso de alto costo (Castellanos, Cortez, Gómez & Rodríguez, 2021).

4.2.2. O₃/UV

Otra combinación con un gran interés es la del ozono con luz ultravioleta, esto se debe al aumento de la producción de radicales •OH. Un comportamiento que puede favorecer en la degradación de compuestos recalcitrantes y es que usándolos por separado no se efectúan los mismos resultados que al combinarlos. Es un método que ha sido aplicado en la potabilización de aguas y en el tratamiento de aguas residuales altamente contaminadas debido a su actividad potenciada al aplicar UV en el ozono (Castellanos, Cortez, Gómez & Rodríguez, 2021).

4.2.3. UV/H₂O₂

Esta combinación ofrece grandes ventajas, una de ellas es que el oxidante al ser comerciante genera un acceso accesible, también es térmicamente estable y puede almacenarse en un lugar con los recaudos necesarios. Al poseer

solubilidad infinita en agua, no existen inconvenientes de transferencia de masa asociados a gases, como en el caso del ozono. Cuenta con una fuente efectiva de producción de dos radicales $\bullet\text{OH}$ por cada H_2O_2 . Una de sus mayores desventajas es la baja efectividad que tiene para degradar alcanos fluorados o clorados, que no suelen ser atacados por los hidroxilos y la baja eficiencia para tratar aguas de alta absorbancia (Castellanos, Cortez, Gómez & Rodríguez, 2021).

En el presente trabajo de investigación son utilizados diferentes métodos, los cuales se interpretan cómo sistemas simples y combinados, con diferencia en dosis administrada o gramos de reactivo adicionados durante la preparación de la muestra o puesta en marcha del reactor de tratamiento, dichos métodos utilizados se enlistan a continuación mostrando las variables en cuanto a dosis y gramos mencionados:

4.3. Sistemas Simples

O_3 : variación en dosis durante el tratamiento tales cómo 200mg/h, 400mg/h y 1000mg/h.

H_2O_2 : variación en dosis administrada tales cómo 1mL, 2mL, 4mL.

UV: radiación única con potencia de 7Watts.

4.4. Sistemas Combinados

$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$: variación en dosis de H_2O_2 administrada tales cómo 1mL, 2mL, 4mL y 5mL a dosis constante de O_3 de 400mg/h.

UV/ H_2O_2 : variación en dosis de H_2O_2 administrada tales cómo 1mL, 2mL, 4mL y 5mL y radiación UV constante de 7Watts.

$\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$: variación en dosis de H_2O_2 administrada tales cómo 1mL, 2mL y 4mL a dosis constante de O_3 de 400mg/h y radiación UV constante de 7Watts.

TiO₂/UV/H₂O₂: variación en gramos de TiO₂ (0.5gr y 0.25gr respectivamente) durante la preparación de la muestra, variación en dosis de H₂O₂ administrada tales como 1mL, 2mL y 4mL y radiación UV constante de 7Watts.

TiO₂/O₃/UV/H₂O₂: variación en gramos de TiO₂ (0.5gr y 0.25gr respectivamente) durante la preparación de la muestra, variación en dosis de H₂O₂ administrada tales como 1mL, 2mL y 4mL a dosis constante de O₃ de 400mg/h y radiación UV constante de 7Watts.

5. Reactor químico

Un reactor químico es un equipo en el cual se produce una reacción química, esto significa que en su interior se produce un cambio en la composición química de la materia introducida, generando compuestos diferentes a lo que inicialmente eran, a estos compuestos se les conoce como productos y subproductos (Deza, Manrique & Osorio, 2017).

Estos reactores se diseñan de manera que se obtenga la mejor conversión y selectividad, los resultados de la reacción química sean lo más óptimos posibles. Pueden contener un catalizador, compuesto que mejora la cinética de reacción, en función de la reacción que se lleva a cabo dentro del reactor (Deza, Manrique & Osorio, 2017).

5.1. Tipos de Reactores

5.1.1. Reactor tipo CSTR

Los reactores continuos de tanque agitado (CSTR) son las unidades de proceso de mayor importancia en un proceso químico industrial, en el CSTR los reactivos se introducen y los productos se extraen simultáneamente y en forma continua. Se considera que un CSTR es homogéneo y por lo tanto se modela sin variaciones espaciales en la concentración, temperatura o velocidad de reacción en todo el recipiente. De hecho, la consideración más importante en relación con la dinámica del CSTR es que ocurre un mezclado perfecto dentro del reactor. Esto significa que las propiedades de la mezcla reactante se consideran uniformes en cualquier parte dentro del recipiente de reacción y por lo tanto son idénticas a las propiedades de la corriente de salida (Levenspiel, 2004).

Otra consideración importante es que la corriente de entrada se mezcla instantáneamente con la mezcla presente en el reactor. En la práctica, si un elemento de material reactante que entra se distribuye uniformemente por todo el tanque en un tiempo mucho más corto que el tiempo de residencia promedio en el tanque, por lo que en el tanque se puede considerar una buena mezcla homogénea (Levenspiel, 2004).

5.1.2. Reactor tipo PFR

Los reactores de flujo pistón son reactores químicos homogéneos que trabajan en estado estacionario, es decir, las propiedades de este tipo de reactores son constantes en el tiempo. También son conocidos como PFR (*Plug Flow Reactor*) y se caracterizan por no mezclar de forma axial las corrientes que se encuentran dentro de los reactores y que forman parte del proceso. Consiste en un tubo vacío, también puede contener catalizadores en forma de empaque para acelerar o retardar las reacciones que se llevan a cabo. Los perfiles de temperatura y concentración se expresan en función de la posición del fluido dentro del reactor. Los reactivos entran al reactor y fluyen a través de este en dirección axial. Durante el recorrido los reactivos son consumidos y la conversión va aumentando con la longitud (Levenspiel, 2004).

5.1.3. Reactor tipo *Batch*

Son reactores estacionarios que mantienen un volumen constante con agitación, cuentan con una salida, misma por donde se toman muestras y esto depende de su diseño y necesidades del proceso, por otra parte, cuenta con entradas para los dispositivos y/o sustancias a ser usadas durante el proceso y puedan ser depositadas o administradas al sistema conforme sean necesarias durante el proceso (Deza, Manrique & Osorio, 2017).

5.2. Características

Entre las características más destacadas de este tipo de reactores son destacadas las siguientes (Deza, Manrique & Osorio, 2017):

- ❖ Proporciona el tiempo de contacto suficiente entre las sustancias para conseguir la reacción deseada.

- ❖ El tiempo de contacto para conseguir una mezcla deseada con la sustancia y los reactivos a utilizar.
- ❖ Descomposición: la cual consiste en que las moléculas se dividen formando así radicales.
- ❖ Combinación: sucede cuando una molécula se une con otra especie formando un compuesto nuevo.

6. Estado del Arte

En el estado del arte se muestran artículos científicos citados para el presente trabajo de investigación, así como los parámetros considerados por los autores, procedimientos y resultados obtenidos para su posterior comparación.

Alarcón & Ramírez, 2021, utilizaron películas delgadas de seleniuro de zinc (ZnSe) modificadas con iones Fe^{2+} y Cu^{2+} y usando como reactivo $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Parmeac, 50 mmol L^{-1}), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, SeO_2 , KCl y polivinilpirrolidona PVP (Aldrich Sigma, 10, 1, 100 mmol $\cdot \text{L}^{-1}$ y 4g $\cdot \text{L}^{-1}$), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, anaranjado de metilo (Riedel-de Haen, 1, 0,05 mmol L^{-1}), H_2SO_4 (Fermont, 98% (m/m)) por el método de electrodeposición y usadas como catalizadores en el proceso de fotoelectrocatalisis, la caracterización del material sintetizado indicó la presencia de micropartículas con un tamaño de 0,5 μm . Los difractogramas de rayos X, mostraron los planos (111) y (220) de ZnSe, así como el plano (111) de FeSe. Así también, los espectros Raman mostraron vibraciones características del ZnSe. La presencia de Zn, Se y Cu fueron corroborados por la técnica EDS, en una proporción no estequiométrica. Las películas de ZnSe y ZnSe-Fe mostraron máximos de absorción cercanos a 545 nm, mientras que la película de ZnSe-Cu mostró una reducción de energía hasta 595 nm. El compuesto ZnSe mostró una buena actividad electrocatalítica con decoloración total en 45 minutos, al introducir los iones de Fe^{2+} y Cu^{2+} , mejoró el tiempo de decoloración a 35 minutos para ZnSe-Fe y 25 minutos para ZnSe-Cu.

Assis, Pastre & Silva, 2019, utilizaron resinas de intercambio iónico en solución acuosa de sal inorgánica, preparada mediante agitación por 30 minutos a una $T = 25^\circ \text{C}$, la muestra se mantiene en agitación constante por 24 horas y

Centrifugación por 20 minutos a 3000 rpm para su preparación previa a medición mediante espectrofotometría a longitudes de onda de 670 nm y 463 nm. Frente a la resina comercial, la recuperada presentó una capacidad adsortiva superior; la resina recuperada aniónica (R-) adsorbió 22% más que la comercial aniónica (C-), mientras que la capacidad adsortiva de la resina catiónica (R+) y de la comercial catiónica (C+) fueron prácticamente semejantes. Aplicando los modelos matemáticos de adsorción, se halló que la recuperación no sufrió modificación en el perfil adsortivo, que permaneció homogéneo (Langmuir), mientras que en las resinas C+ y R+ ocurrió la modificación del perfil de adsorción, que varió de homogéneo a heterogéneo (Freundlich), respectivamente. En pruebas de espectro en la luz infrarroja fue posible constatar que la recuperación modifica la morfología de la resina, pero no su estructura química.

Berber, Bernal, Delgado, Espinosa, Hernández & Martínez, 2017, usaron la adsorción con carbón activado y preparación de muestras con concentraciones de 100-600 ppm de colorante Naranja Remazol a pH de 3, 7 y 9 unidades respectivamente. El pH de la solución con el colorante Naranja Remazol y el PCC del CA jugaron un rol muy importante en el proceso de adsorción, considerando la influencia de la carga superficial del CA y consecuentemente de las interacciones electrostáticas entre las moléculas del colorante y la superficie del adsorbente. La máxima capacidad de adsorción se dio cuando el valor del pH de la solución con colorante fue más bajo (pH 3) que el PCC del CA (8.9); es decir que conforme el pH de la solución se acercó al PCC del CA, disminuyó la capacidad de adsorción debido principalmente a las interacciones electrostáticas que se generan entre la superficie del adsorbente y el colorante.

Castellanos, Cortez, Gómez & Rodríguez, 2021 emplearon fotocátalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO₂) empleando un reactor fotocatalítico con capacidad de 500 ml y lampara de luz UV de potencia de 8 watts y disoluciones de 50 ppm de orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina, las variables de cantidad de catalizador (0,3, 0,5, 0,7 y 0,9 g/L), de oxidante (0, 300, 500 y 700 ppm) y las condiciones del pH (2, 4, 6 y 7) se analizaron por triplicado en el proceso de degradación a velocidad de agitación de 700 rpm y un volumen de muestra de 50

ml. Para el muestreo se extrajeron 2 ml de solución a intervalos de 15 minutos utilizando un filtro de membrana *Fisherbrand* con un tamaño de poro de 0,22 μm . En el proceso de degradación de la 2-NA (orto-nitroanilina) y la 3-NA (meta-nitroanilina) en el reactor prototipo, con variaciones en el pH, la concentración de oxidante y la cantidad de semiconductor, se llegaron a obtener degradaciones de 93,5 y 97,6 % de los compuestos, respectivamente. Para la degradación de la 2-NA se requirieron altas concentraciones del oxidante y pH ácidos, contrario a la degradación del isómero 3-NA. La cinética de degradación obtenida mediante el método gráfico y el análisis mediante el mecanismo de Langmuir-Hinshelwood resultó en un pseudo-orden cero para ambos sistemas, lo que indica que los isómeros de la nitroanilina recubren el catalizador en su totalidad durante la degradación. Por otro lado, el análisis DRX no evidenció un cambio significativo en la estructura por saturación del catalizador o la incorporación de materia orgánica en el semiconductor.

Deza, Manrique & Osorio, 2017, evaluaron la acción fotocatalítica de nanopartículas industriales de TiO_2 , el rango de la medida fue realizado en 5 a 80° (2θ) con un paso de 0,03 grados y un tiempo de 50 segundos por paso, con un tiempo aproximado de 16 minutos a temperatura ambiente, todas las mediciones TEM se realizaron con una suspensión de 100 mg/l para cada medición, 1 ml de la solución coloidal se colocó sobre una rejilla de cobre recubierta de carbono y se dejaron secar durante 5 minutos. Las NPs- TiO_2 o fotocatalizador se colocó dentro de un reactor conteniendo 1L de solución 20ppm del colorante azul Cibacron Navy- H_2G e irradiados con luz UV de una lámpara de mercurio de 250 W, con burbujeo de oxígeno con agitación constante y a temperatura ambiente hasta la observación de la decoloración. A través de la evaluación experimental de la degradación fotocatalítica del colorante textil azul, Cibacron Navy H_2G empleando como fotocatalizadores nanopartículas de TiO_2 de la fase anatasa, con un tamaño promedio de 24 nm, medidos por TEM, y con controles de UV-Visible en función al tiempo de la decoloración y degradación del colorante se determina que los parámetros que aumentan la velocidad del proceso corresponden a 0,6 g de nanopartículas de TiO_2 , 20 ppm de colorante y pH 4.

Lizarazo & Orduz, 2016 realizaron la síntesis de nanocompuestos de nanotubos de carbono/ TiO_2 -N bajo luz visible mediante oxidación fotocatalítica, se emplearon

soles de TiO_2 modificados con trietilamina y nanotubos de carbono de pared múltiple dispersos bajo baño de ultrasonido, posteriormente sometidos a tratamiento térmico y calcinación a 400°C , la preparación de la solución de 5 ppm de colorante por un tiempo de 1 hora, usando una concentración de fotocatalizador en polvo de 1000 mg/L, fuente de luz visible de potencia de 150 W en un reactor cilíndrico de capacidad de 100 ml usando un volumen de 60 ml y la lectura de muestras mediante espectrofotómetro UV-VIS con una longitud de onda de 464 nm mediante microscopia electrónica de barrido se evidencia que el tratamiento hidrotermal favorece el dopaje de TiO_2 con nitrógeno, formando aglomerados de con baja área superficial. Por otra parte, la actividad fotocatalítica de los compuestos de $\text{TiO}_2\text{-N/MWCNT}$ es menor que $\text{TiO}_2\text{-N}$, debido a una menor área superficial de los materiales y compuestos, producto de la aglomeración de las partículas MWCNT y $\text{TiO}_2\text{-N}$ durante el tratamiento hidrotermal. La gran disminución del área superficial, por la aglomeración de partículas MWCNT y $\text{TiO}_2\text{-N}$, impidió comprobar la hipótesis de la incorporación de nanotubos de carbono al $\text{TiO}_2\text{-N}$ favorece la separación de portadores de carga, lo cual se traduce en una mayor acción fotocatalítica, mismas acciones que permitieron una degradación del colorante naranja de metilo 82-85%.

Capítulo 2

Metodología

2. Metodología global.

En la Figura 2 se observa el diagrama general de la metodología utilizada en el proceso experimental, es importante destacar que en apartados posteriores se describe detalladamente.

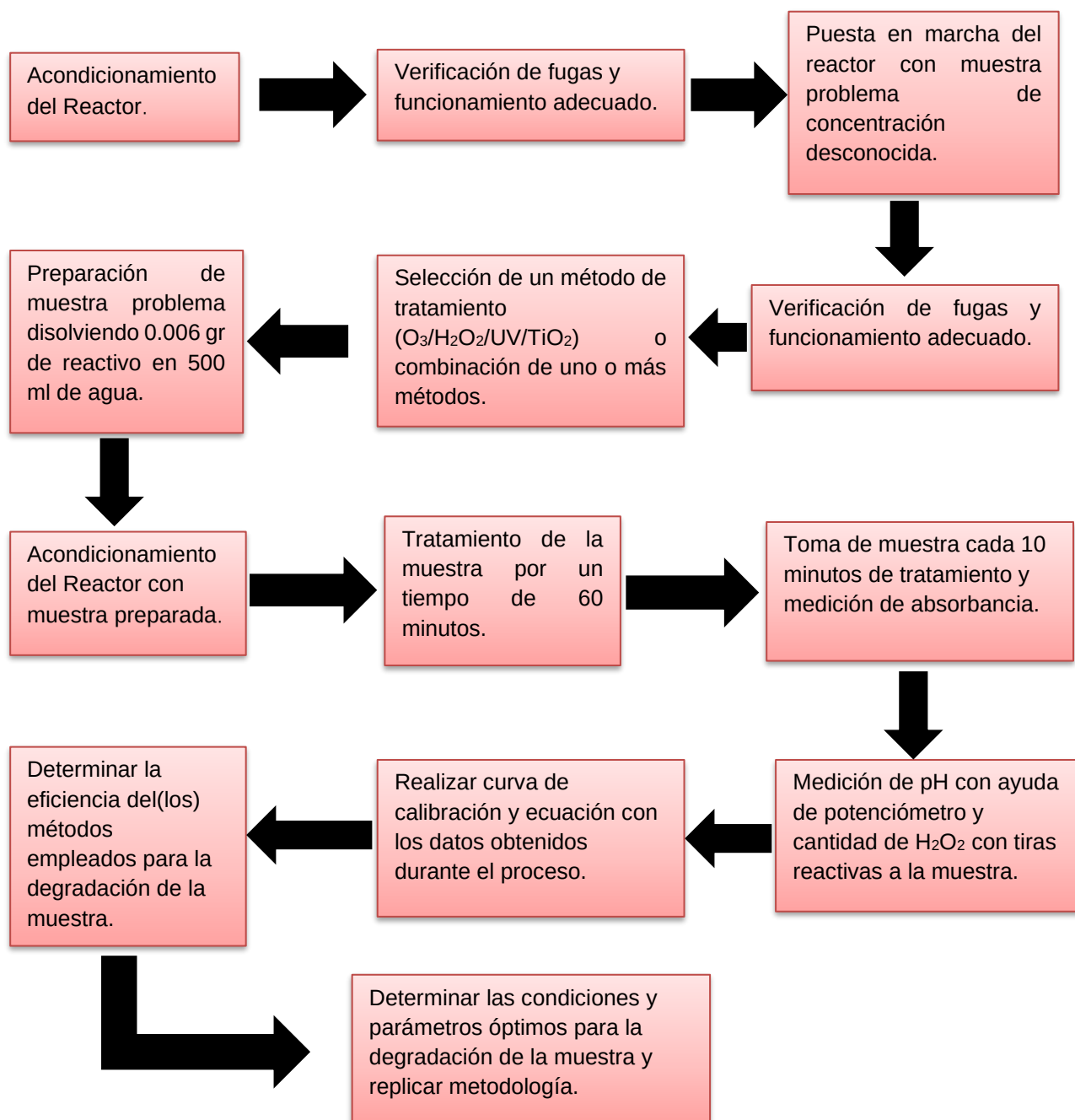


Figura 2. Proceso global del proceso experimental.

2.1 Instrumentos y reactivos utilizados

Los instrumentos y reactivos utilizados se describen en la Tabla 3, especificando sus características principales.

Tabla 3. Instrumentos utilizados en el desarrollo experimental

Nombre	Especificaciones
Instrumentos	
Espectrometro UV-vis 	Espectrofotómetro UV-vis-HACH-DR6000. Ofrece un alto rendimiento tanto en las tareas rutinarias del laboratorio como en aplicaciones de fotometría exigentes. Este sistema está diseñado para el trabajo eficaz de los laboratorios profesionales. El software inteligente ayuda en la rutina de calibración, el control de calidad y el desarrollo de aplicaciones personalizadas.
Generador de ozono 	Generador de Ozono GL-2186. No requiere instalación, solo conectar y poner a trabajar, elimina virus, bacterias, hongos y malos olores, previene alergias respiratorias, evita contagios de enfermedades y puede usarse en pequeñas purificadoras, hogar y oficina por su fácil transporte.
Lampara ultravioleta	Lampara ultravioleta NUOCHONG para pecera esterilizadora.

	Permite una emisión de rayos UV de potencia de 7Watts en el agua, además de ser sumergible exponiendo los organismos vivos, como bacterias, virus o quistes a una longitud de onda ultravioleta germicida. Con suficiente energía, la radiación UV interrumpe el ADN en los microorganismos patógenos para que no puedan reproducirse.
Medidor de pH 	Medidor de pH Digital Hanna-HI98103. Este medidor nos permite conocer digitalmente el pH de una muestra o sustancia conocida, por su portabilidad nos permite llevarlo a donde sea y poder ser utilizado en cualquier momento.
Balanza analítica 	Balanza Analítica Velab-VE-303. Proporciona la medición exacta de masas o líquidos muy pequeñas, con capacidad de 300g y una sensibilidad de 0.001g (1mg).

Agitador magnetico 	Placa calefactora y agitadora HUMBOLDTH-4942, T=540° C, 120V 60Hz, control de velocidad y temperatura Permite ajustar la velocidad con que se agita la muestra (rpm), permitiendo así una mezcla homogénea de la muestra previamente y durante la fase de tratamiento.
Centrifuga 	Centrifuga LC-8 CON ROTOR DE 8 X 15 mL. Control de velocidad digital hasta 5,000 rpm permite la separación de solutos de sus solventes, el bloqueo de seguridad de la tapa evita que se abra la tapa hasta que el rotor se detenga pues el diseño único de flujo de aire mantiene las muestras frescas, además tiene una capacidad de 8 tubos, para tubos de hasta 15 mL.
Reactivos	
Colorante naranja de metileno grado analítico	No volátil. Es un sólido rojo anaranjado inodoro. Masa molecular: 327.34 g/mol Punto de ebullición: >300 °C Densidad: 1.28 g/cm³ Soluble en 500 partes de agua e insoluble en alcohol. El naranja de metilo puede existir principalmente en dos formas diferentes,

	la forma alcalina (desprotonada) y la ácida (protonada).
Dióxido de titanio 	Este reactivo se caracteriza por su alta estabilidad química, su resistencia al desgaste y sus propiedades ópticas únicas y se presenta generalmente en forma de polvo blanco. Punto de Ebullición: 1840°C Masa Molecular: 79,87 g/mol Densidad: ~4,23 g/cm³
Peróxido de hidrógeno 	En su estado más puro, el H₂O₂ es un líquido incoloro, más viscoso que el agua. Punto de ebullición: 150.2°C Punto de congelación: -0.43°C Densidad: 1.45 g/cm³ Es completamente miscible con agua, lo que permite que se diluya fácilmente en soluciones acuosas. El H₂O₂ es conocido por ser un fuerte oxidante. Puede descomponerse fácilmente en

	agua (H ₂ O) y oxígeno (O ₂), un proceso que se acelera en presencia de catalizadores como el manganeso o la luz ultravioleta.
--	---

2.2. Dispositivo experimental y metodología

2.2.1 Preparación de la muestra

Se realizó una solución sintética del colorante con una concentración inicial de 12 mg/L para lo cual se pesó 0.006 gr del colorante y se disolvió en 500 mL de agua destilada, se mantuvo en agitación constante 15 minutos para garantizar su homogeneización.

2.2.2 Identificación del colorante

Fue utilizado un espectrómetro UV-visible modelo *Hach* para la identificación y cuantificación del naranja de metilo, por esta razón, fue realizada una solución sintética de 12 mg/L y se efectuó un barrido en longitudes de onda de 190 nm a 1000 nm estableciendo la máxima longitud en 460 nm (Figura 3) , siendo esta la utilizada para todos los estudios posteriores. Es importante mencionar que debido al instrumento utilizado fue necesario realizar una curva de calibración, los resultados obtenidos se presentaran en el Capítulo 3.

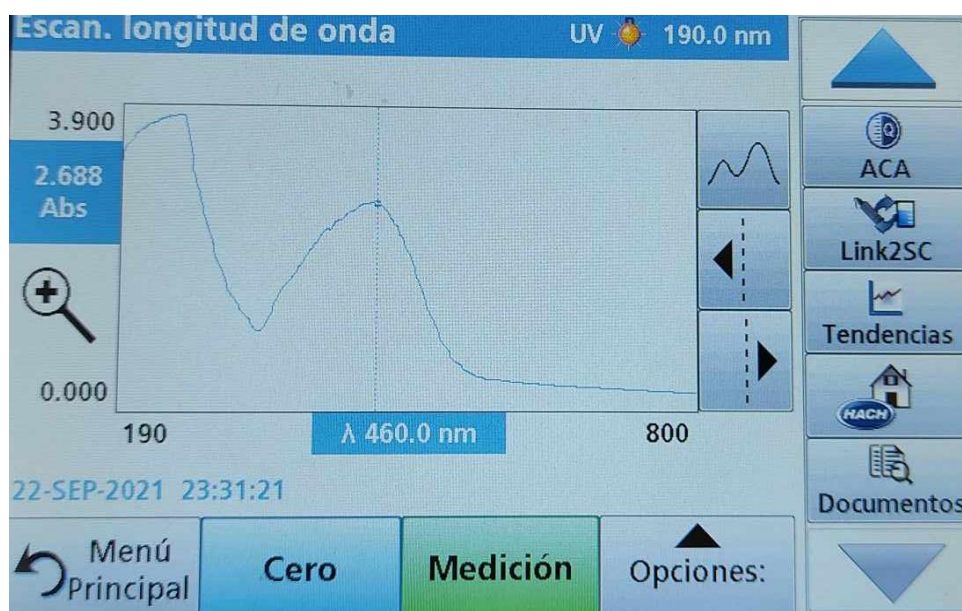


Figura 3. Determinación de la máxima longitud de onda del naranja de metileno.

2.2.3 Reactor de tratamiento

En la Figura 4 se observa el reactor de tratamiento, el cual es tipo *batch*, de configuración cilíndrica de Nylamid. Las dimensiones del reactor son de 7 cm de diámetro y 21 cm de largo, en su interior de una lámpara de luz ultravioleta de 7 W que emite a una longitud de 254 nm protegida por un tubo de cuarzo ubicada en la parte central del dispositivo, en la parte inferior posee una piedra difusora que suministra el ozono en forma de micro burbujas, es utilizado un agitador magnético para garantizar su homogeneización. En la parte superior del sistema, existe un puerto por el cual se toma la muestra para su posterior análisis en el espectrómetro, con un dispositivo multiparamétrico se mide el pH y la conductividad eléctrica (EC) de la solución.

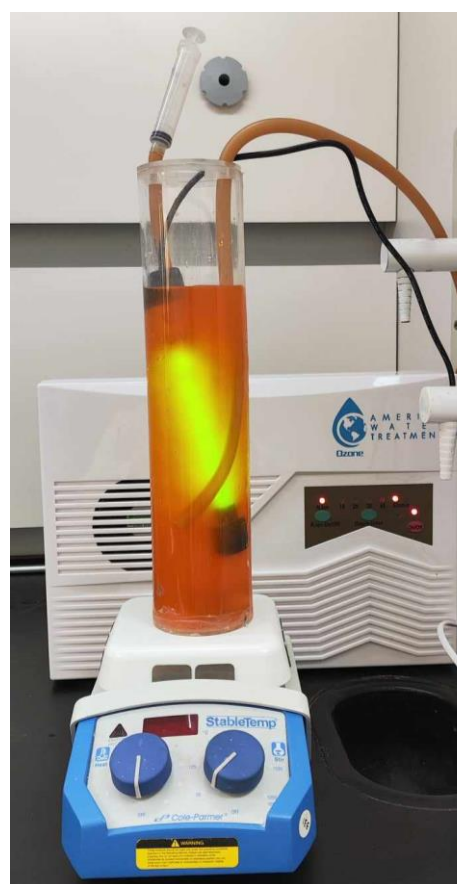
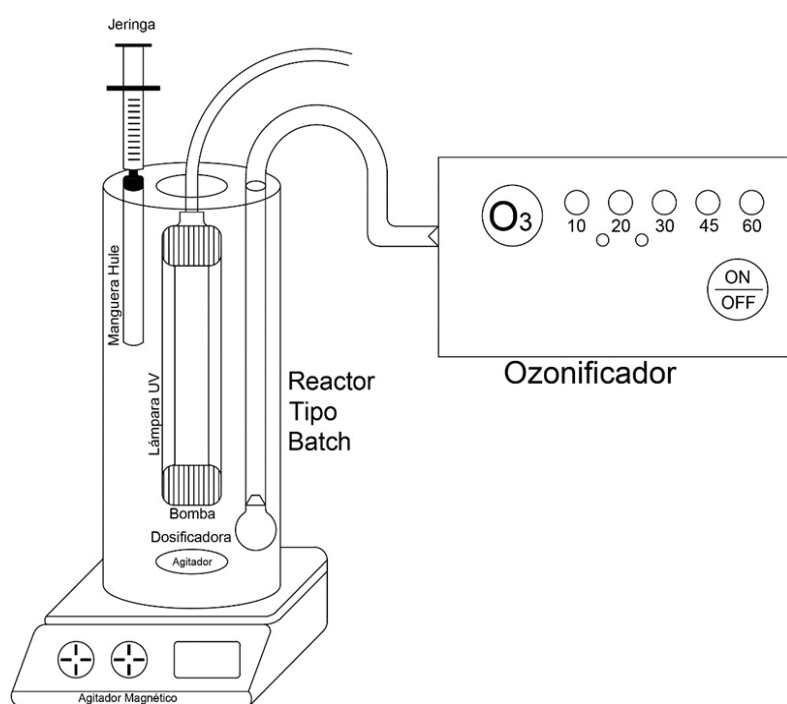


Figura 4. Reactor de tratamiento.

2.2.4 Metodología experimental

La metodología consistió en el tratamiento de naranja de metilo aplicando diversos Métodos de Oxidación Avanzada, para lo cual una vez preparada la muestra se introduce en el reactor tipo *batch*, y dependiendo del agente oxidante este es adicionado: el H_2O_2 se adicionó directamente en el reactor de tratamiento es importante mencionar que se determinó el efecto del volumen inicial en el proceso de oxidación variando su volumen en 1 mL, 2 mL, 3mL, 4mL y 5mL, cuando fue utilizado ozono este fue inyectado mediante un difusor para garantizar un mayor contacto con la solución y fue utilizado aire atmosférico para su generación, por otra parte, se evaluó el efecto de la concentración inicial de ozono generada (400 mg/L, 200 mg/L, 400 mg/L) únicamente para sistemas individual. El TiO_2 fue adicionado directamente en el reactor de tratamiento (0.5 g y 0.25 g) y fue activado con la lámpara que emite en el ultravioleta, cuya potencia es de 7 W.

Una vez acondicionado el reactor y adicionando los agentes oxidantes correspondientes, se pone en marcha el proceso con un tiempo de tratamiento de 60 minutos, tomando muestras cada 10 minutos y analizándolo mediante el espectrómetro UV-vis, simultáneamente se mide pH, y cualitativamente se observó el cambio de coloración antes, durante y al finalizar el tratamiento.

Cuando se utilizó H_2O_2 se determinó su variación, utilizando tiras reactivas, y cuando fue utilizado TiO_2 , antes de ser analizada la muestra se centrifugó durante 1 minuto a 4000 rpm.

2.2.5 Experimentos desarrollados

Como se ha mencionado con anterioridad se aplicaron diversos Métodos de Oxidación Avanzada para la degradación del colorante, en la Tabla 4 se observan todos los métodos aplicados.

Tabla 4. Combinación de agentes oxidantes y reactivos por experimento.

Método aplicado	Reactivos							
	H ₂ O ₂				TiO ₂		O ₃ 400mg/h	UV 7W
	1 mL	2 mL	4 mL	5 mL	0.5 gr	0.25 gr		
O ₃							X	
O ₃ /UV							X	X
O ₃ / H ₂ O ₂				X			X	
UV/ H ₂ O ₂				X				X
UV								X
H ₂ O ₂			X					
H ₂ O ₂		X						
H ₂ O ₂	X							
O ₃ / H ₂ O ₂			X				X	
O ₃ / H ₂ O ₂		X					X	
O ₃ / H ₂ O ₂	X						X	
UV/ H ₂ O ₂			X					X
UV/ H ₂ O ₂		X						X

	H ₂ O ₂				TiO ₂		O ₃ 400mg/h	UV 7W
Método aplicado	1 mL	2 mL	4 mL	5 mL	0.5 gr	0.25 gr		
UV/ H ₂ O ₂	X							X
O ₃ /UV/ H ₂ O ₂			X				X	X
O ₃ /UV/ H ₂ O ₂		X					X	X
O ₃ /UV/ H ₂ O ₂	X						X	X
TiO ₂ /UV/ H ₂ O ₂			X		X			X
TiO ₂ /UV/ H ₂ O ₂		X			X			X
TiO ₂ /UV/ H ₂ O ₂	X				X			X
TiO ₂ /UV/ H ₂ O ₂			X			X		X
TiO ₂ /UV/ H ₂ O ₂		X				X		X
TiO ₂ /UV/ H ₂ O ₂	X					X		X
TiO ₂ /O ₃ /UV/ H ₂ O ₂			X		X		X	X
TiO ₂ /O ₃ /UV/ H ₂ O ₂		X			X		X	X

	H ₂ O ₂				TiO ₂		O ₃ 400mg/h	UV 7W
Método aplicado	1 mL	2 mL	4 mL	5 mL	0.5 gr	0.25 gr		
TiO ₂ /O ₃ /UV/ H ₂ O ₂	X				X		X	X
TiO ₂ /O ₃ /UV/ H ₂ O ₂			X			X	X	X
TiO ₂ /O ₃ /UV/ H ₂ O ₂		X				X	X	X
TiO ₂ /O ₃ /UV/ H ₂ O ₂	X					X	X	X
							O ₃ 200mg/h	
O ₃							X	
							O ₃ 1000mg/h	
O ₃							X	

Capítulo 3

Resultados

3.1 Descripción general del capítulo

Este capítulo se dividirá en dos etapas, en la primera se presentan los resultados obtenidos de la degradación del colorante modelo naranja de metilo aplicando diversos Métodos de Oxidación Avanzada, posteriormente, se presentarán los resultados obtenidos de la degradación de los colorantes secundarios, específicamente cristal violeta, tartrazina y colorantes comerciales.

3.2 Resultados de la degradación de naranja de metilo

3.2.1 Curva de Calibración y determinación de eficiencia de degradación.

Como se mencionó en el capítulo 2, fue utilizado un espectrofotómetro UV-vis para la identificación y el análisis de las muestras, por lo que fue necesario la realización de una curva de calibración. El método se basa en la relación entre concentraciones conocidas y la obtención de su absorbancia (respuesta del instrumento de análisis), posteriormente se realiza la regresión de mínimos cuadrados (Tabla 5 y Figura 5), con el objetivo de determinar la ecuación matemática que relaciona al conjunto de datos (ecuación 1).

Tabla 5. Datos obtenidos para la curva de calibración.

x (Concentración en ppm)	y (Absorbancia a 460 nm)	xy	x^2	y^2
120	2.838	340.560	14400	8.054
100	2.580	258.000	10000	6.656
80	2.306	184.480	6400	5.318
60	1.967	118.020	3600	3.869
40	1.540	61.600	1600	2.372
20	1.138	22.760	400	1.295
10	0.796	7.960	100	0.634
$\Sigma x =$	$\Sigma y =$	$\Sigma xy =$	$\Sigma x^2 =$	$\Sigma y^2 =$
430	13.165	993.380	36500	28.198

$$y = mx + b \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde m y b son determinadas mediante las ecuaciones:

$$m = \frac{n\Sigma(xy) - \Sigma x \Sigma y}{n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$b = \frac{\Sigma y \Sigma x^2 - \Sigma x \Sigma(xy)}{n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Finalmente, el % de degradación se obtiene mediante la ecuación 4:

$$\% = \frac{\text{Absorbancia inicial} - \text{Absorbancia en tiempo } t}{\text{Absorbancia Inicial}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Aplicando las ecuaciones anteriores, se obtuvieron los siguientes datos (Ecuaciones 5-6):

$$m = \frac{n\sum(xy) - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} = \frac{7(993.38) - (430)(13.165)}{7(36500) - 430^2} = 0.0183 \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum (xy)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} = \frac{(13.165)(36500) - (430)(993.38)}{7(36500) - 430^2} = 0.7559 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Obteniendo la ecuación 7, en donde y representa la absorbancia y x la concentración.

$$y = 0.0183x + 0.7559 \quad (\text{Ecuación 7})$$

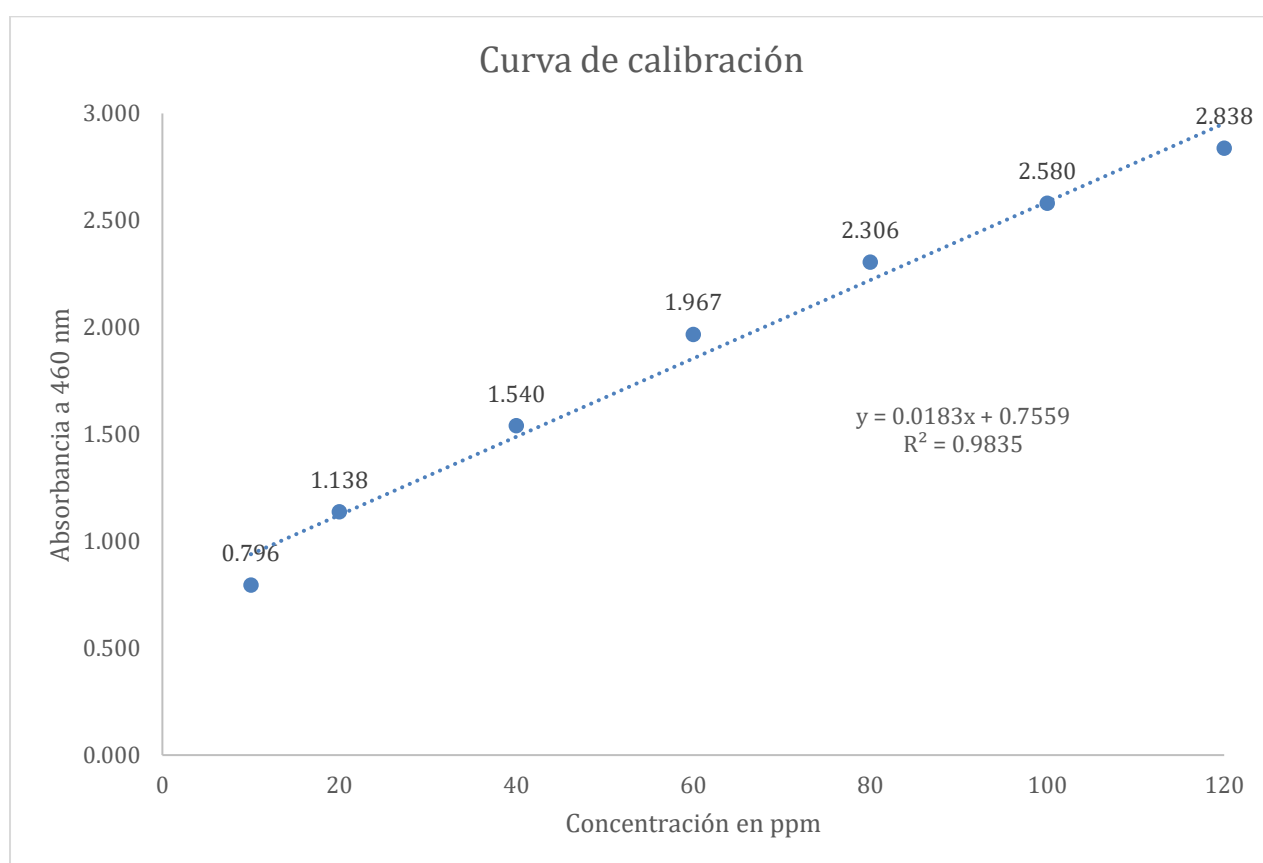


Figura 5. Regresión de mínimos cuadrados

3.3. Resultados en % de degradación de la combinación de agentes oxidantes y reactivos por experimento.

En el siguiente apartado se muestran las gráficas de comparación y degradación de colorante naranja de metileno utilizando cada método de tratamiento, ya sea simple o combinado a través del tiempo de tratamiento de 60 minutos. Así como los datos de absorbancia de cada muestra y el % de degradación con forme al tiempo de tratamiento transcurrido.

3.3.1. Ozono O₃

Tabla 6. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método O₃ a diferentes dosis en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

t (min)	O ₃ 400 mg/h		O ₃ 200 mg/h		O ₃ 1000 mg/h	
	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	3.015	0.00%	2.815	0.00%	2.803	0.00%
10	1.816	39.77%	1.785	36.59%	2.032	27.51%
20	1.550	48.59%	1.693	39.86%	1.973	29.61%
30	1.392	53.83%	1.492	47.00%	1.835	34.53%
40	0.859	71.51%	1.463	48.03%	1.597	43.02%
50	0.245	91.87%	1.404	50.12%	1.637	41.59%
60	0.136	95.49%	1.332	52.68%	1.637	41.59%

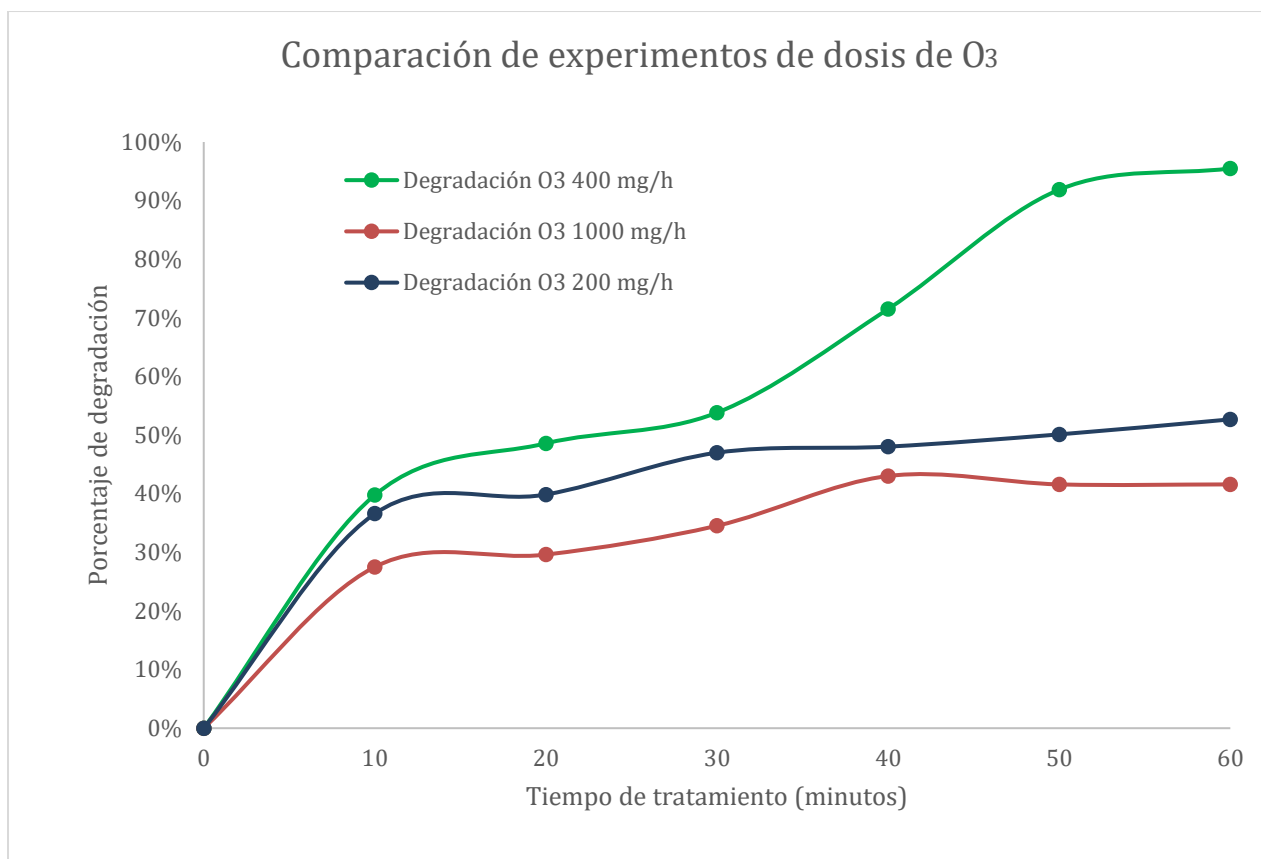


Figura 6. Comparación de experimentos de dosis de O₃.

Como se puede observar en la Figura 6, la dosis de O₃ que brinda un mayor % de degradación del naranja de metileno son 400mg/h, esta dosis permite un tiempo de reacción adecuado pues la dosis se suministra de manera uniforme y permite un tiempo de contacto adecuado para la reacción:



A diferencia de las dosis 200mg/h y 1000mg/h, la dosis de 200mg/h al ser una dosis pequeña no permite un tiempo de reacción adecuado para la generación de radicales OH•, por tanto, los productos de la reacción solo son O₂, O₃ y H₂O₂ residual que se emiten a la atmosfera.

En comparación con la dosis de 1000mg/h, al ser una dosis alta, satura bastante de O₃ el reactor de tratamiento y la reacción es casi inmediata, pero al paso de cierto tiempo dicha saturación evita la reacción del naranja de metileno con el O₃ y los productos de la reacción son O₂, O₃ y H₂O₂ residual que se emiten a la atmosfera y se

percibe que la reacción continua debido a que se aprecia la reducción de coloración del naranja de metileno en la muestra, esta afirmación del cambio de coloración es la misma para la dosis de 200mg/h.

3.3.2. Peróxido de Hidrogeno H_2O_2

Tabla 7. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método H_2O_2 a diferentes dosis en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

	H_2O_2 4ml		H_2O_2 2ml		H_2O_2 1ml	
t (min)	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	2.818	0.00%	2.795	0.00%	2.786	0.00%
10	2.800	0.64%	2.700	3.40%	2.708	2.80%
20	2.790	0.99%	2.639	5.58%	2.702	3.01%
30	2.750	2.41%	2.615	6.44%	2.676	3.95%
40	2.709	3.87%	2.591	7.30%	2.570	7.75%
50	2.735	2.94%	2.585	7.51%	2.580	7.39%
60	2.722	3.41%	2.600	6.98%	2.515	9.73%

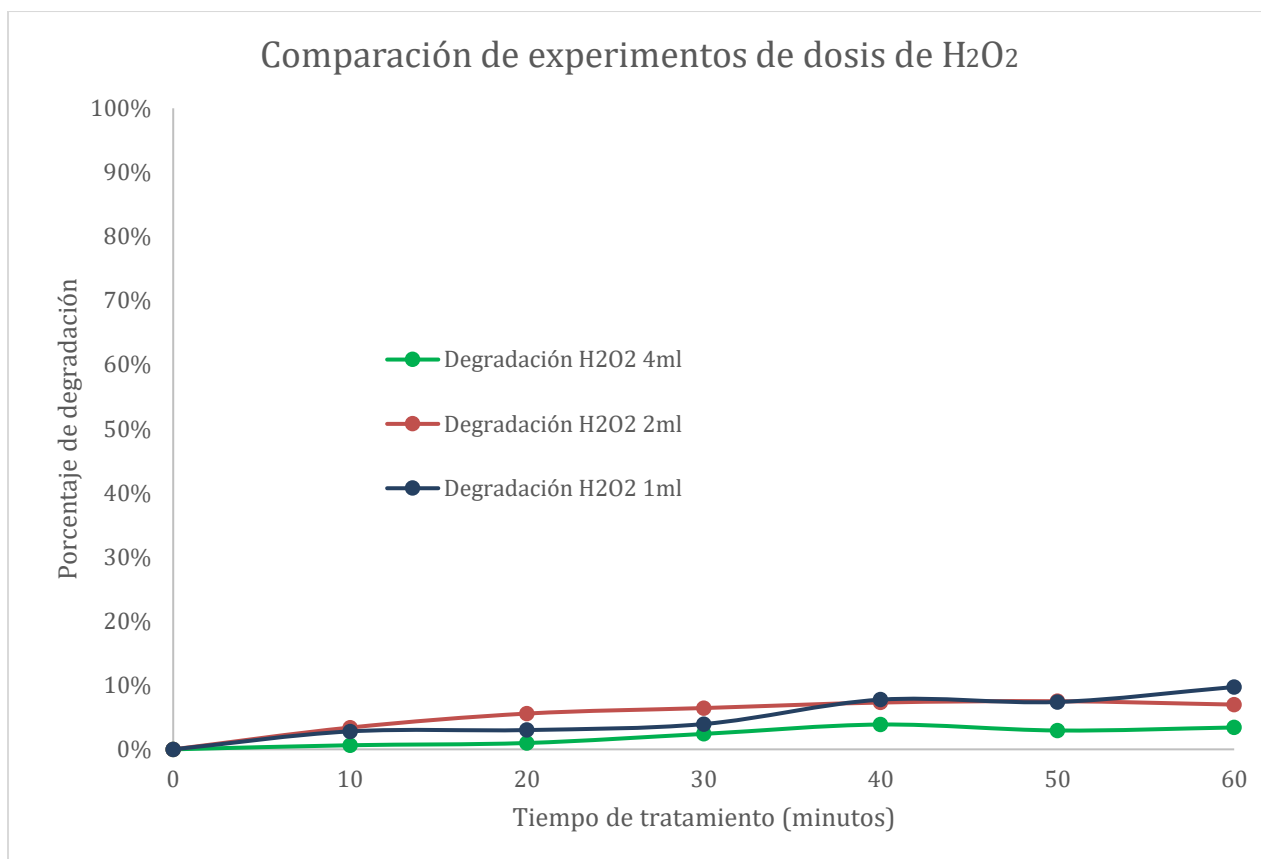


Figura 7. Comparación de experimentos de dosis de H_2O_2 .

En la Figura 7 se muestran los resultados de tratamiento del naranja de metileno con H_2O_2 , es notorio que el porcentaje de degradación del colorante es mínima, esto se puede interpretar a que la dosis administrada es alta, ya que a menor cantidad de H_2O_2 el % de degradación es mayor y esto podría atribuirse a que a mayor cantidad de H_2O_2 existe una saturación en concentración de radicales $OH^\bullet$, para la cual sería necesario un catalizador que permita la reacción de los radicales $OH^\bullet$ y de esta manera una mayor degradación del naranja de metileno.

3.3.3. Comparación de Ozono O₃, Peróxido de Hidrogeno H₂O₂ y Radiación Ultravioleta UV

Tabla 8. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno comparando cada agente oxidante O₃, H₂O₂ y UV en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

	O ₃ 400 mg/h		UV(7watts)		H ₂ O ₂ (1ml)	
t (min)	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	3.015	0.00%	2.871	0.00%	2.786	0.00%
10	1.816	39.77%	2.794	2.68%	2.708	2.80%
20	1.550	48.59%	2.735	4.74%	2.702	3.01%
30	1.392	53.83%	2.728	4.98%	2.676	3.95%
40	0.859	71.51%	2.724	5.12%	2.570	7.75%
50	0.245	91.87%	2.723	5.15%	2.580	7.39%
60	0.136	95.49%	2.723	5.15%	2.515	9.73%

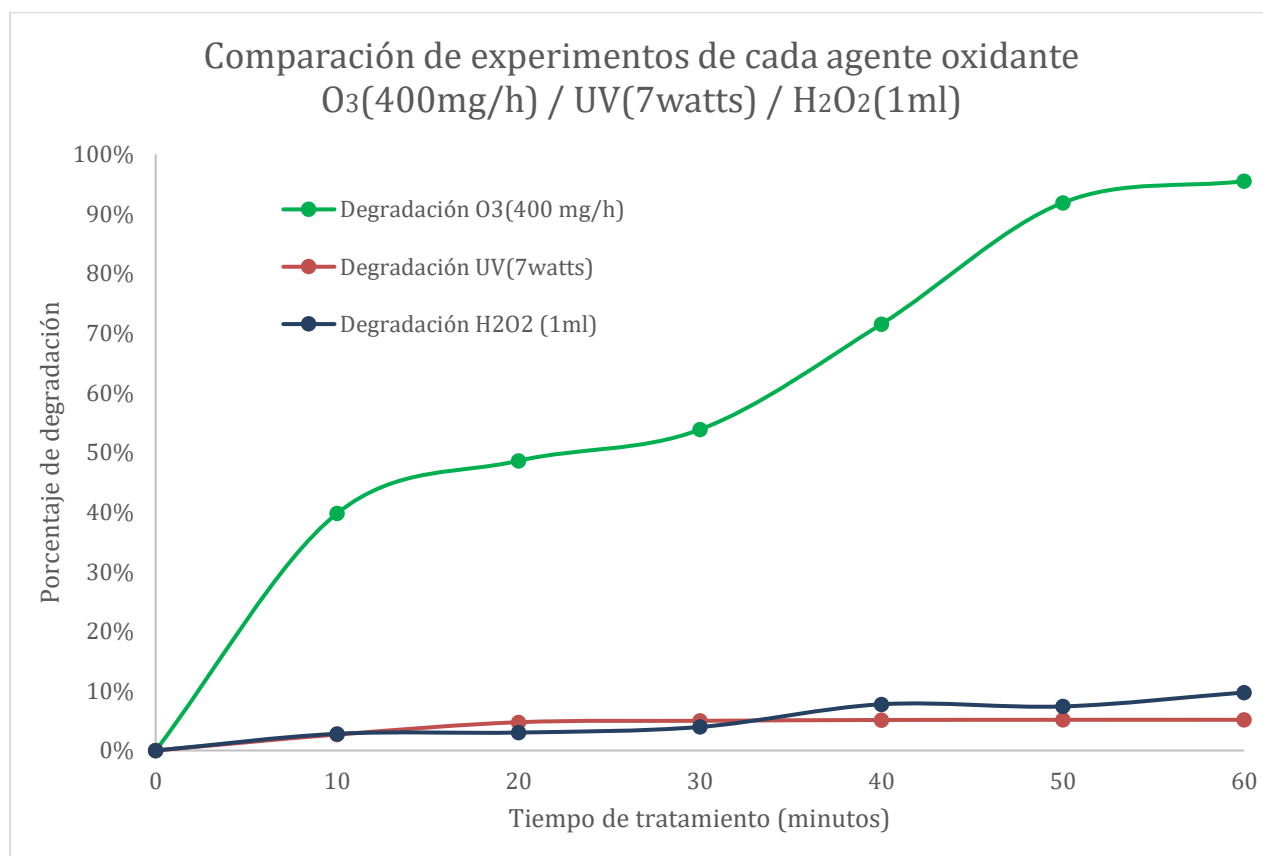


Figura 8. Comparación de experimentos de cada agente oxidante.

En la Figura 8 podemos apreciar la comparación de cada método por individual comparando las dosis con mejores resultados en sus respectivas comparaciones, es notorio que la dosis de O_3 nos brinda una mayor degradación del naranja de metileno, tomando en cuenta la observación en la experimentación con diferentes dosis de H_2O_2 , la combinación de UV/ H_2O_2 podría tener un mayor efecto de degradación por medio de un tratamiento de fotólisis.

3.3.4. Combinación de los métodos Ozono O₃ y Peróxido de Hidrogeno H₂O₂

Tabla 9. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método O₃/H₂O₂ en variación de dosis de H₂O₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

t (min)	O ₃ (400mg/h) / H ₂ O ₂ (5ml)		O ₃ (400mg/h) / H ₂ O ₂ (4ml)		O ₃ (400mg/h) / H ₂ O ₂ (2ml)		O ₃ (400mg/h) / H ₂ O ₂ (1ml)	
	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	3.314	0.00%	2.468	0.00%	2.595	0.00%	2.861	0.00%
10	2.741	17.29%	2.444	0.97%	2.206	15.00%	1.771	30.10%
20	2.351	20.06%	2.331	5.55%	1.918	26.09%	1.524	46.73%
30	1.938	41.52%	2.158	12.56%	1.691	34.84%	1.192	58.34%
40	1.662	49.85%	1.936	21.55%	1.396	46.20%	0.696	75.67%
50	1.438	56.61%	1.847	25.16%	1.008	61.16%	0.264	90.77%
60	0.882	73.38%	1.620	34.36%	0.468	81.96%	0.229	91.99%

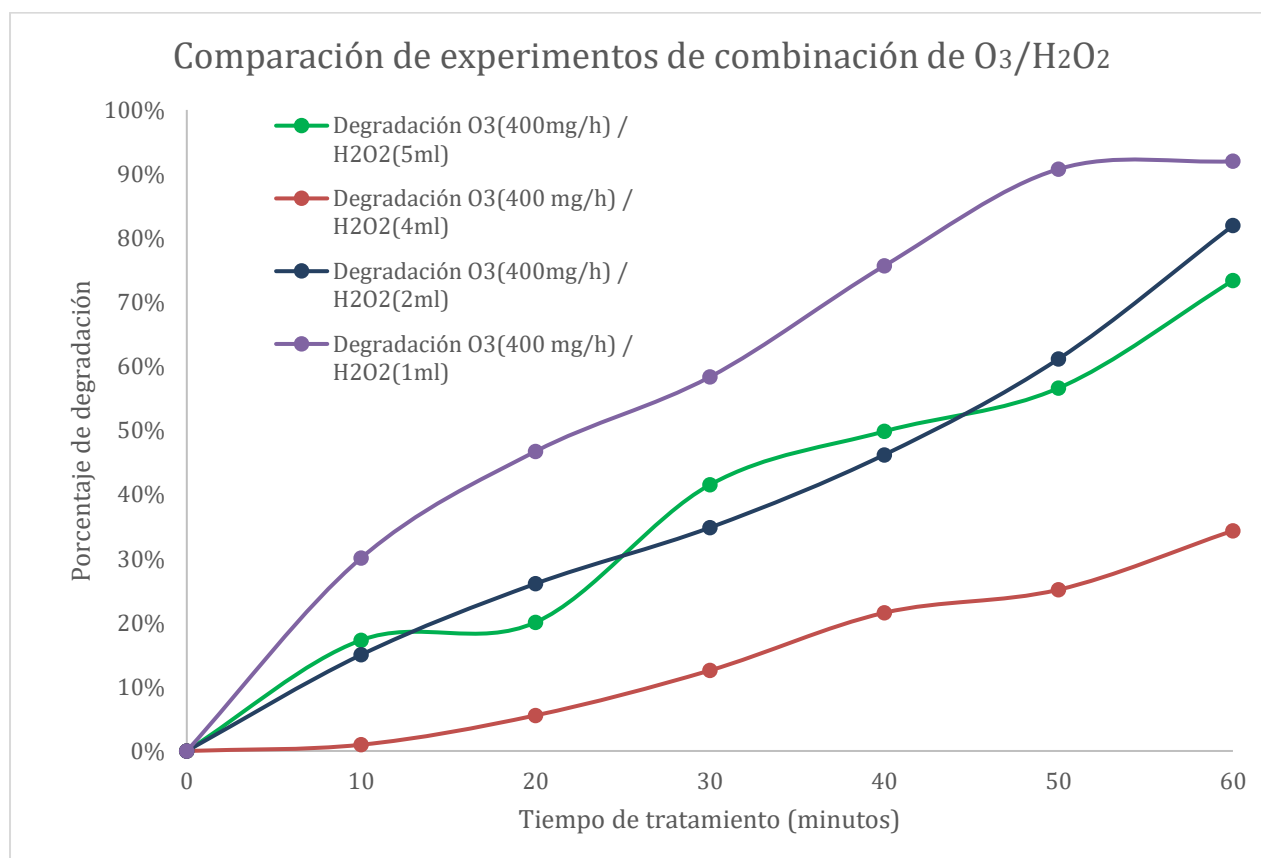
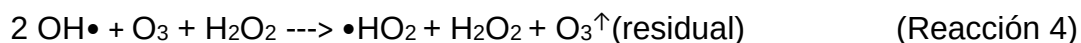


Figura 9. Comparación de combinación de experimentos O₃/H₂O₂ con variación en dosis de H₂O₂.

Como se puede observar en la Figura 9 la combinación de O₃/H₂O₂ genera una mayor degradación del naranja de metileno en comparación con el uso de H₂O₂ y UV como oxidantes individuales, para esta parte se agregó una dosis de 5mL de H₂O₂ para denotar la diferencia en el proceso a una mayor dosis, permitiendo así la siguiente reacción:



Es notorio que la combinación O₃(400mg/h)/H₂O₂(1ml) permite una mayor degradación del colorante, puesto que al agregar mayor cantidad de H₂O₂ no muestra un mayor efecto de degradación, puesto que los agentes oxidantes reaccionan entre sí y comienzan a generar subproductos, además se atribuye que existe una saturación en concentración de radicales OH[•].

3.3.5 Combinación de los métodos Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H₂O₂

Tabla 10. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método UV/H₂O₂ en variación de dosis de H₂O₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

	UV / H ₂ O ₂ (5ml)		UV / H ₂ O ₂ (4ml)		UV / H ₂ O ₂ (2ml)		UV / H ₂ O ₂ (1ml)	
t (min)	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	3.317	0.00%	2.779	0.00%	3.108	0.00%	3.025	0.00%
10	2.942	11.30%	2.593	6.69%	2.700	13.13%	2.425	19.83%
20	2.688	18.96%	2.561	7.84%	2.715	12.64%	2.512	16.96%
30	2.552	23.06%	2.381	14.32%	2.759	11.23%	2.263	25.19%
40	2.277	31.35%	2.253	18.93%	2.466	20.65%	2.238	26.02%
50	2.061	37.86%	2.163	20.25%	2.375	23.58%	2.212	26.88%
60	1.629	50.89%	2.145	22.81%	2.325	25.19%	2.135	29.42%

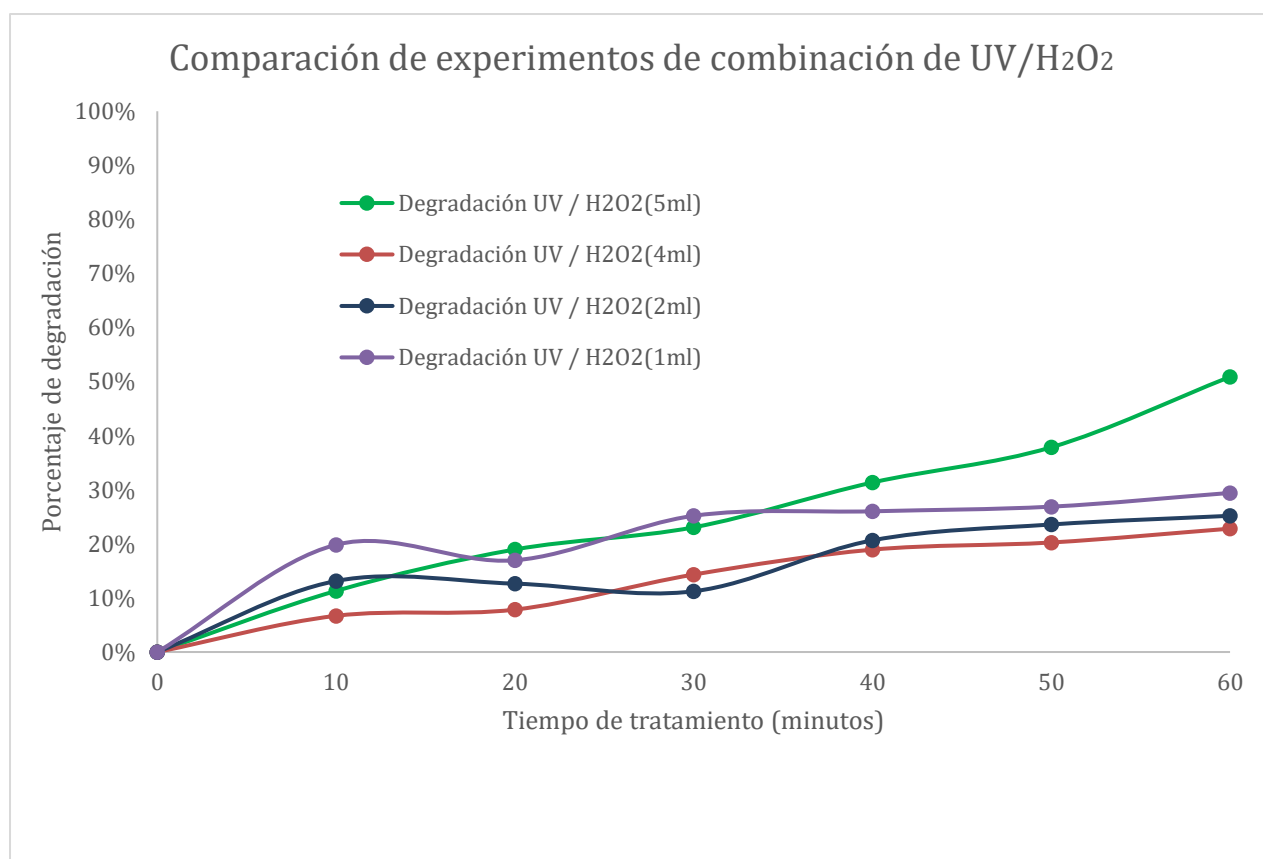
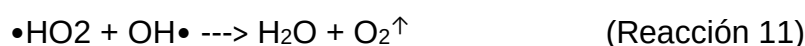
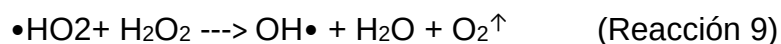
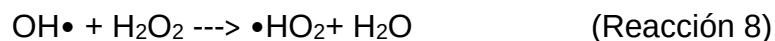


Figura 10. Comparación de combinación de experimentos UV/H₂O₂ con variación en dosis de H₂O₂.

Para este momento, la Tabla 10 nos muestra los resultados de degradación del naranja de metileno usando la combinación UV/H₂O₂, del mismo modo se analiza la dosis de 5mL de H₂O₂ para denotar la diferencia durante el proceso mediante la siguiente reacción:



En la combinación de estos métodos se lleva a cabo un proceso de fotólisis, donde la radiación UV permite la ruptura de enlaces químicos del H₂O₂ generando así radicales 2 OH•, cómo se mencionaba anteriormente al agregar mayor cantidad de H₂O₂ no muestra un mayor efecto de degradación, puesto que los agentes oxidantes reaccionan entre sí y comienzan a generar subproductos, para este caso 5mL de H₂O₂ tienen un mayor agente oxidante puesto que al existir una fuente de energía (radiación UV) que permite la generación de radicales OH• mediante fotólisis, esto permite que la reacción química sea controlada al permitir un tiempo de contacto adecuado de los radicales OH• y la degradación del colorante conforme al tiempo de contacto.

3.3.6. Combinación de los métodos Ozono O₃, Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H₂O₂

Tabla 11. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método O₃/UV/H₂O₂ en variación de dosis de H₂O₂ en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

t (min)	O ₃ (400mg/h) / UV / H ₂ O ₂ (4ml)		O ₃ (400mg/h) / UV / H ₂ O ₂ (2ml)		O ₃ (400mg/h) / UV / H ₂ O ₂ (1ml)	
	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	2.644	0.00%	2.773	0.00%	2.634	0.00%
10	2.021	23.56%	2.039	26.47%	2.006	23.84%
20	1.792	32.22%	1.823	34.26%	1.775	32.61%
30	1.518	42.59%	1.556	43.89%	1.563	40.66%
40	1.273	51.85%	1.258	54.63%	1.346	48.90%
50	0.847	67.96%	0.702	74.68%	0.668	74.64%
60	0.194	92.66%	0.194	93.00%	0.281	89.33%

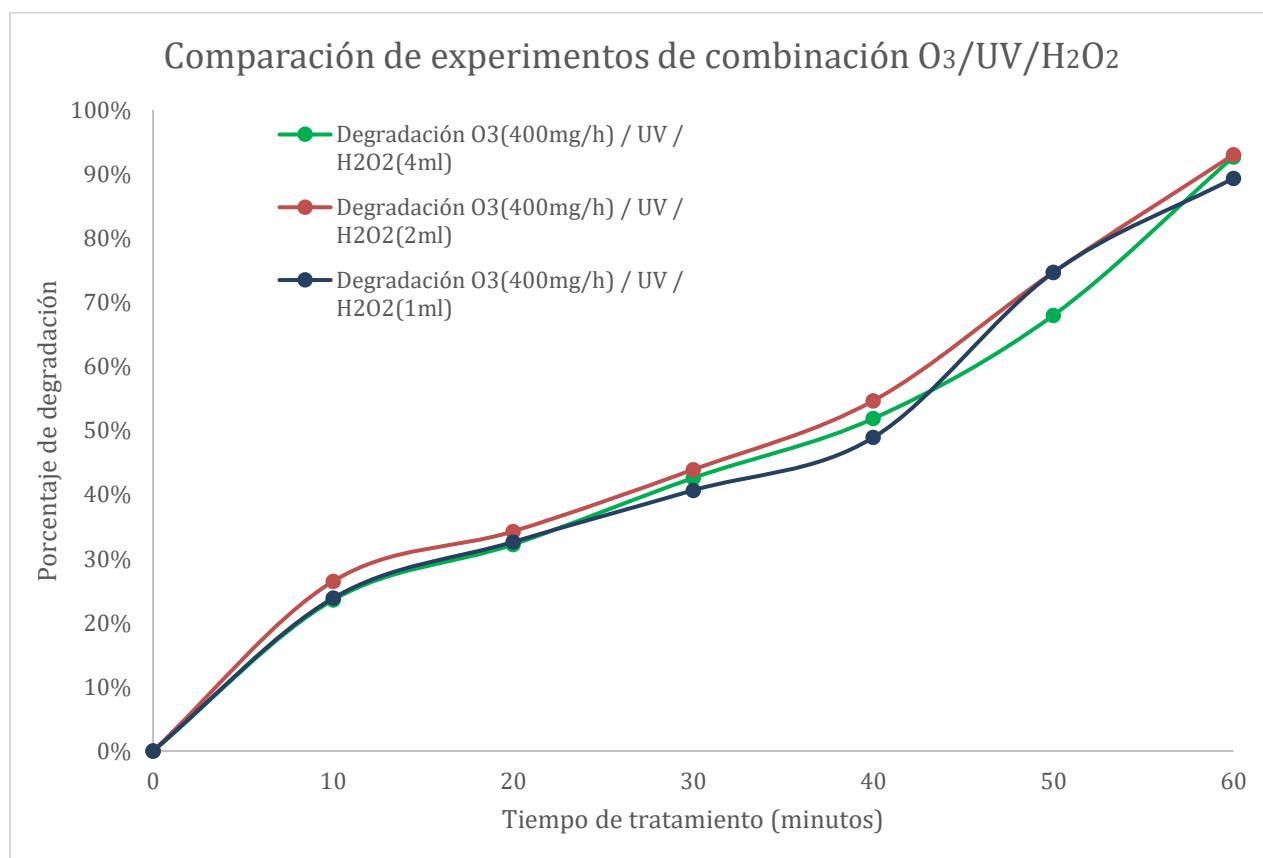
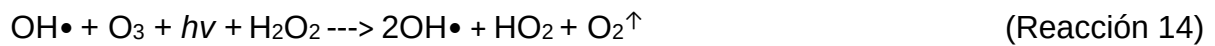
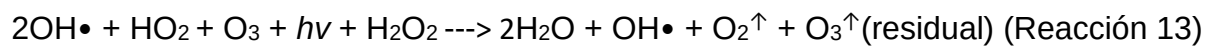
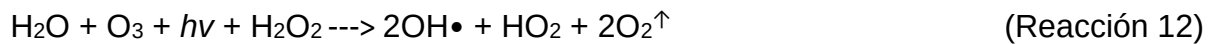


Figura 11. Comparación de combinación de experimentos O₃/UV/H₂O₂ con variación en dosis de H₂O₂.

Como se puede observar en la Figura 11, la combinación $O_3(400\text{mg/h})/UV/H_2O_2(2\text{ml})$ permite una mayor degradación del naranja de metileno por muy poco porcentaje, la combinación de estos 3 métodos permite una correcta y adecuada generación de radicales $OH^\bullet$ por un tiempo de contacto adecuado, la variación en porcentaje se debe a que una vez que el H_2O_2 se encuentra en menor concentración, la reacción química tiende a suspenderse por la ausencia de radicales $OH^\bullet$ y lo único que se está generando en el proceso es H_2O , $O_2^\uparrow$ y $O_3^\uparrow(\text{residual})$, dicha afirmación se expresa en la siguiente reacción:



3.3.7. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.5 g), Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2

Tabla 12. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método $\text{TiO}_2(0.5\text{g})/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ en variación de dosis de H_2O_2 en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

	$\text{TiO}_2(0.5\text{g}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(4\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.5\text{g}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(2\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.5\text{g}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(1\text{ml})$	
t (min)	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	2.685	0.00%	2.670	0.00%	3.135	0.00%
10	1.817	32.33%	1.792	32.88%	2.109	32.72%
20	1.876	30.13%	1.766	33.86%	2.269	27.62%
30	1.853	30.99%	1.818	31.91%	2.313	26.22%
40	2.058	23.35%	1.913	28.35%	2.162	31.04%
50	1.910	28.86%	1.978	25.92%	2.127	32.15%
60	2.017	24.88%	1.983	25.73%	2.096	33.14%

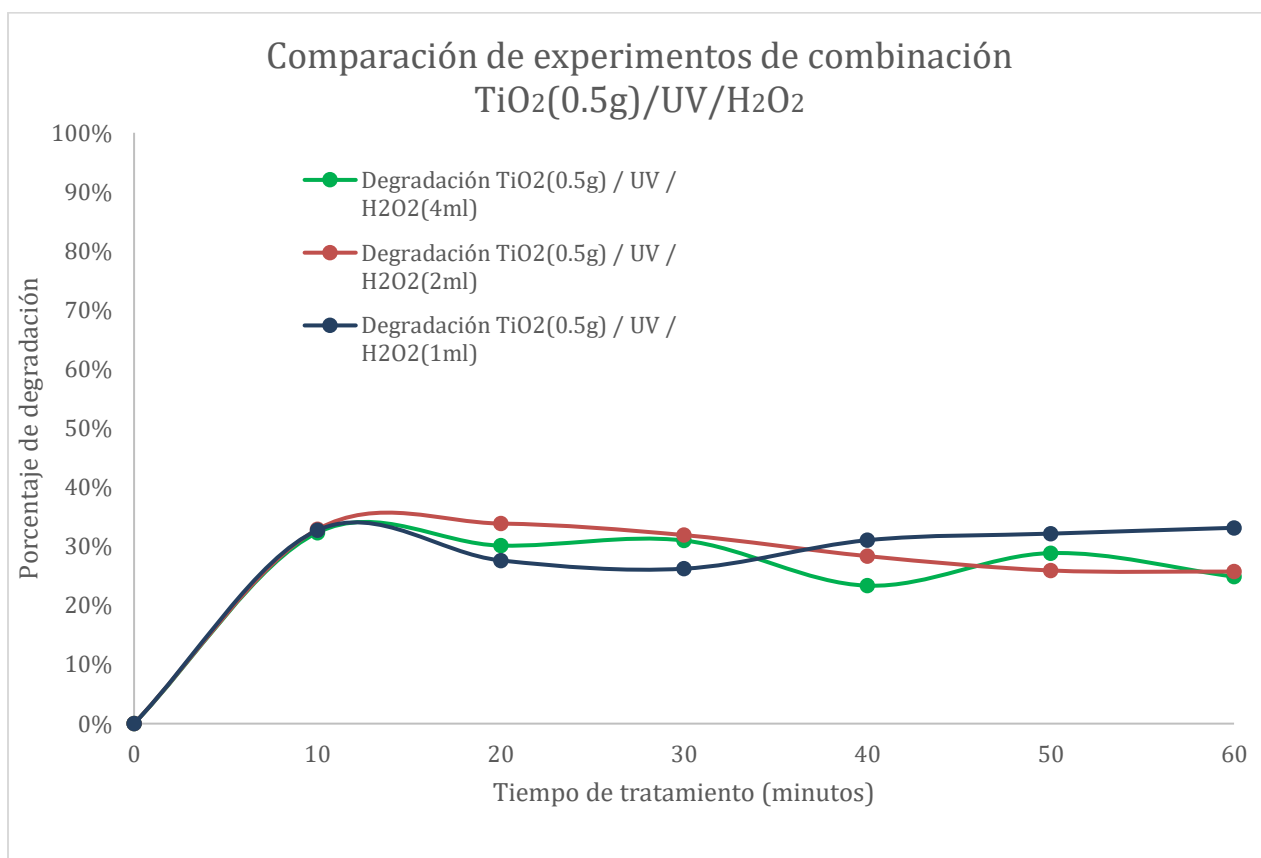


Figura 12. Comparación de combinación de experimentos $\text{TiO}_2(0.5\text{g})/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ con variación en dosis de H_2O_2 .

La Figura 12 nos muestra el % de degradación del naranja de metileno con la combinación de métodos $\text{TiO}_2/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, para este caso la combinación $\text{TiO}_2/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2(1\text{mL})$ presenta una mayor degradación en comparación con las otras combinaciones, para este caso el TiO_2 sirve como catalizador que cede radicales $\text{O}^\bullet$ para la generación de radicales $\text{OH}^\bullet$ mediante la siguiente reacción:



(Reacción 16)

Cómo se ha demostrado en resultados anteriores, a mayor cantidad de H_2O_2 existe una saturación de radicales $\text{OH}^\bullet$ inhibiendo la reacción y generando subproductos, pues para este caso, la dosis de 1mL permite una mayor degradación de colorante.

3.3.8. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.25g), Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2

Tabla 13. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método $\text{TiO}_2(0.25\text{g})/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ en variación de dosis de H_2O_2 en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

	$\text{TiO}_2(0.25\text{g}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(4\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.25\text{g}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(2\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.25\text{g}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(1\text{ml})$	
t (min)	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	2.952	0.00%	2.953	0.00%	2.929	0.00%
10	2.013	31.81%	1.794	39.25%	1.662	43.26%
20	2.044	30.76%	1.991	32.58%	2.223	24.10%
30	1.848	37.40%	1.942	34.24%	1.649	43.70%
40	1.880	36.31%	1.899	35.69%	1.663	43.22%
50	1.970	33.26%	1.869	36.71%	1.788	38.95%
60	1.941	34.25%	1.929	34.68%	1.769	39.60%

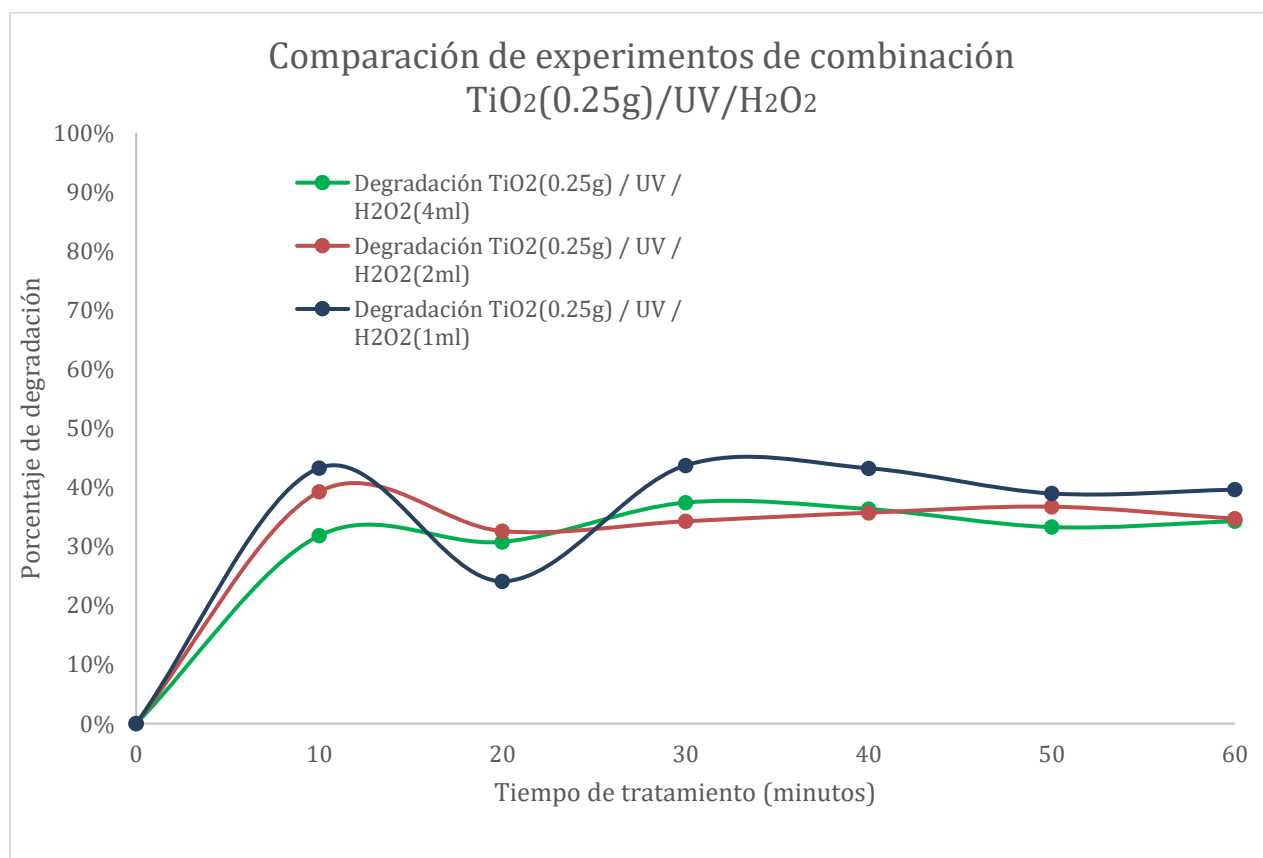


Figura 13. Comparación de combinación de experimentos $\text{TiO}_2(0.25\text{g})/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ con variación en dosis de H_2O_2 .

Hasta este punto en la Figura 13 se muestra el % de degradación del naranja de metileno, basados en la (Reacción 15) y (Reacción 16) se sigue el mismo mecanismo de reacción pero para este caso existe una variación en el gramaje de TiO_2 (0.25g) administrado a la muestra, por tanto podemos apreciar que el % de degradación del colorante varia un poco, por lo que podemos intuir que a menor cantidad de TiO_2 existe una mayor generación de radicales $\text{OH}\bullet$ en cierta cantidad y de este modo la reacción permite oxidar en mayor % el colorante, del mismo modo la combinación de métodos usando 1mL de H_2O_2 tiene un mayor efecto oxidante, pues a mayor cantidad de H_2O_2 existe una saturación de radicales $\text{OH}\bullet$ inhibiendo la reacción y generando subproductos.

3.3.9. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.5g), Ozono O_3 , Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2

Tabla 14. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método $\text{TiO}_2(0.5\text{g})/\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ en variación de dosis de H_2O_2 en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

	$\text{TiO}_2(0.5\text{g}) / \text{O}_3(400\text{mg/h}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(4\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.5\text{g}) / \text{O}_3(400\text{mg/h}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(2\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.5\text{g}) / \text{O}_3(400\text{mg/h}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(1\text{ml})$	
t (min)	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	3.115	0.00%	2.976	0.00%	2.950	0.00%
10	2.203	29.28%	1.778	40.25%	1.548	47.52%
20	1.913	38.59%	1.899	36.19%	1.439	51.22%
30	1.744	44.01%	1.975	33.63%	1.331	54.88%
40	1.692	45.68%	1.759	40.89%	1.260	57.29%
50	1.353	56.56%	0.758	74.53%	0.469	84.10%
60	0.641	79.42%	0.224	92.47%	0.219	92.57%

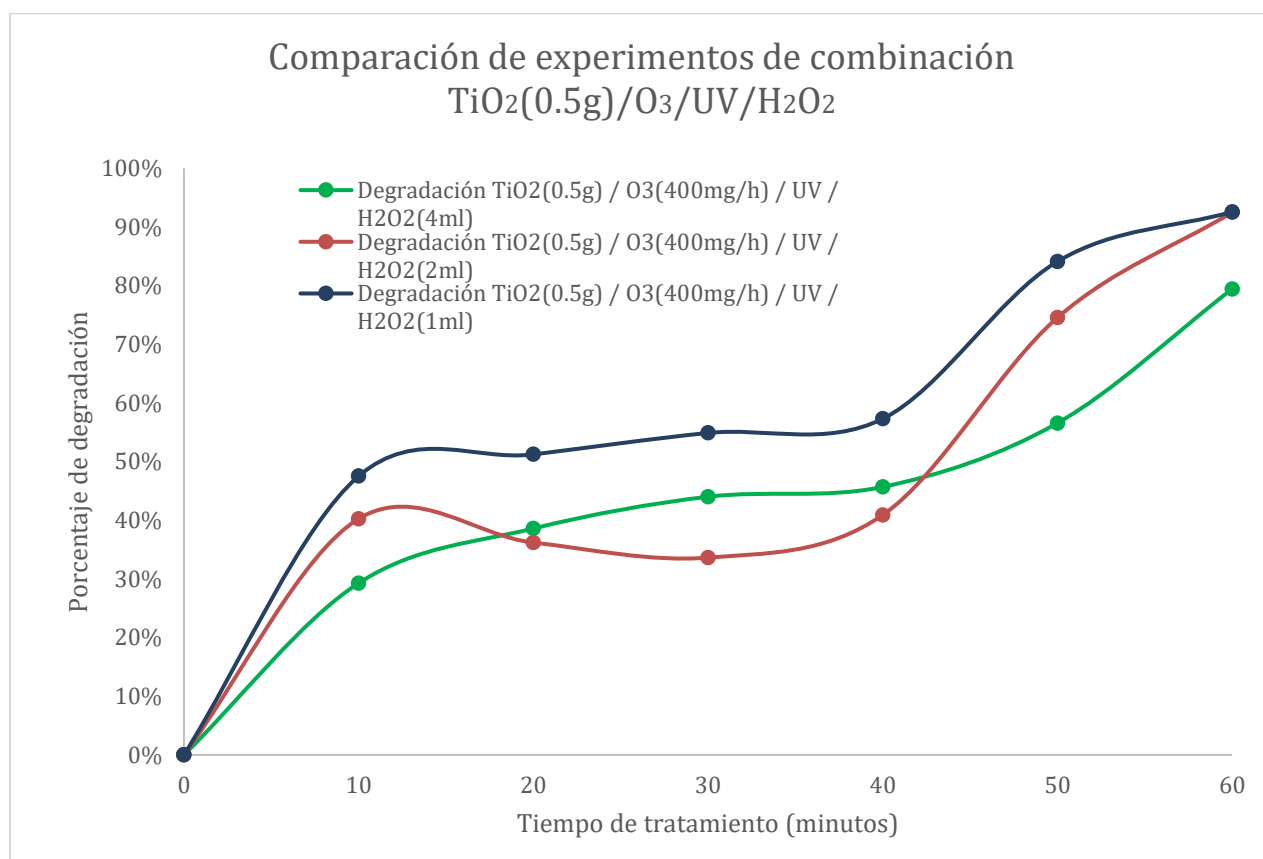
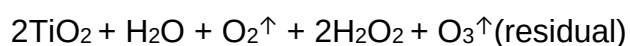
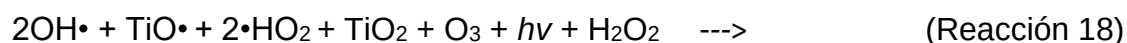
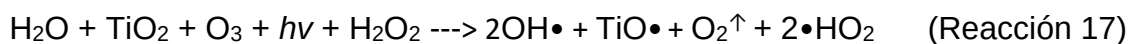


Figura 14. Comparación de combinación de experimentos $\text{TiO}_2(0.5\text{g})/\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ con variación en dosis de H_2O_2 .

Como se puede apreciar en la Figura 14 el % de degradación del colorante naranja de metileno con la combinación de todos los métodos $\text{TiO}_2/\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, siendo la combinación $\text{TiO}_2/\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2(1\text{ml})$ la que presenta mayor degradación en comparación con las otras combinaciones, el aumento es notorio debido a la acción del O_3 para la generación de radicales $\text{OH}\bullet$ cómo se muestra en la siguiente reacción:



Basados en resultados anteriores, a mayor cantidad de H_2O_2 existe una saturación de radicales $\text{OH}\bullet$ inhibiendo la reacción y generando subproductos, pues para este caso, la dosis de 1mL permite una mayor degradación de colorante, aunque esta diferencia es por muy poco considerando la dosis de 2mL de H_2O_2 pues el % de degradación es casi similar, por lo cual podemos intuir que para este caso los 4 métodos combinados entre si trabajan de manera óptima, permitiendo una reacción homogénea dentro del reactor de tratamiento, donde la cantidad de radicales $\text{OH}\bullet$ es la idónea y el tiempo de tratamiento es adecuado.

3.3.10. Combinación de los métodos Oxido de Titanio TiO_2 (0.25g), Ozono O_3 , Radiación Ultravioleta UV y Peróxido de Hidrogeno H_2O_2

Tabla 15. Datos de absorbancia y % de degradación de naranja de metileno con el método $\text{TiO}_2(0.25\text{g})/\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ en variación de dosis de H_2O_2 en un tiempo de tratamiento de 60 minutos.

	$\text{TiO}_2(0.25\text{g}) / \text{O}_3(400\text{mg/h}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(4\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.25\text{g}) / \text{O}_3(400\text{mg/h}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(2\text{ml})$		$\text{TiO}_2(0.25\text{g}) / \text{O}_3(400\text{mg/h}) / \text{UV} / \text{H}_2\text{O}_2(1\text{ml})$	
t (min)	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%	Abs (nm)	%
0	2.942	0.00%	3.005	0.00%	2.869	0.00%
10	1.661	43.54%	1.668	44.49%	1.569	45.31%
20	1.479	49.73%	1.475	50.91%	1.458	49.18%
30	1.475	49.86%	1.421	52.71%	1.425	50.33%
40	1.325	54.96%	1.338	55.47%	1.122	60.89%
50	1.095	62.78%	0.848	71.78%	0.339	88.18%
60	0.582	80.22%	0.122	95.94%	0.122	95.75%

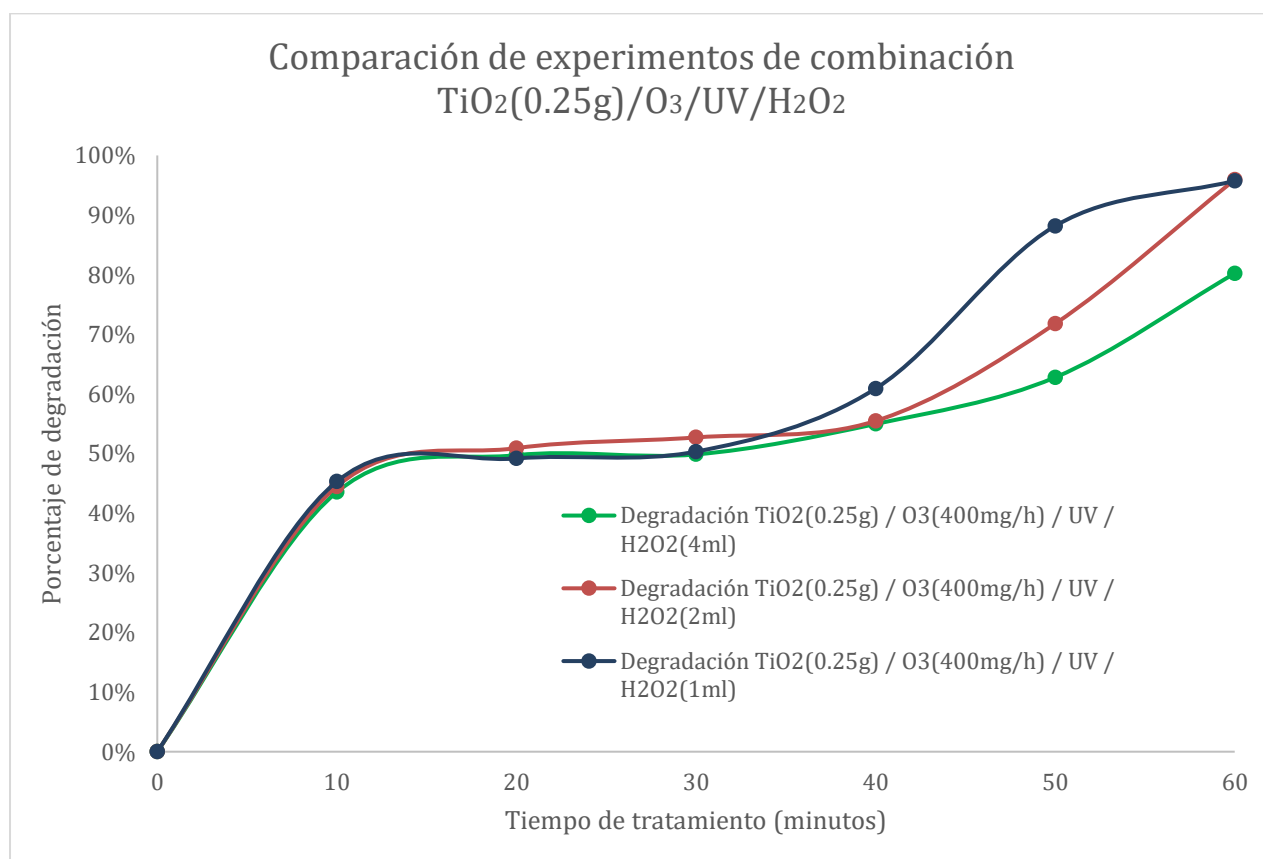


Figura 15. Comparación de combinación de experimentos $\text{TiO}_2(0.25\text{g})/\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ con variación en dosis de H_2O_2 .

Para este punto en la Figura 15 se muestra el % de degradación del naranja de metileno, basados en la (Reacción 17) y (Reacción 18) se sigue el mismo mecanismo de reacción pero, para este caso, existe una variación en el gramaje de TiO_2 (0.25g) administrado a la muestra, por lo que podemos intuir que a menor cantidad de TiO_2 existe una mayor generación de radicales $\text{OH}\cdot$, usando 1mL de H_2O_2 tiene un mayor efecto oxidante, para las otras combinaciones el % de degradación es similar, por lo que podemos decir que 0.25g de TiO_2 es una cantidad más óptima para el proceso y garantiza una diferencia en degradación de naranja de metileno ya que la combinación de los 4 métodos entre sí, trabajan de manera óptima, permitiendo una reacción homogénea dentro del reactor de tratamiento, donde la cantidad de radicales $\text{OH}\cdot$ es la idónea y el tiempo de tratamiento es adecuado.

3.3.11. Figuras extras donde se muestran las pruebas realizadas



Figura 16. Pruebas Individuales e inicio de pruebas con 2 agentes oxidantes.



Figura 20. Total de pruebas realizadas (37 pruebas) durante este trabajo de investigación.

Como se puede observar en la Tabla 6 y Tabla 15, los métodos con los mejores resultados realizando la comparación de dosis administrada y combinación de métodos son:

- O_3 (400 mg/h) = 95.49%
- TiO_2 (0.25 gr) / O_3 (400 mg/h) / UV (7W) / H_2O_2 (2 ml) = 95.94%
- TiO_2 (0.25 gr) / O_3 (400 mg/h) / UV (7W) / H_2O_2 (1 ml) = 95.75%

Para este trabajo de investigación se tomó en cuenta la cantidad de agentes oxidantes, así como la combinación necesaria de estos para lograr el resultado y/o % de degradación, evidentemente las combinaciones TiO_2 (0.25 gr) / O_3 (400 mg/h) / UV / H_2O_2 (2 ml) y TiO_2 (0.25 gr) / O_3 (400 mg/h) / UV / H_2O_2 (1 ml), tienen un mejor resultado en comparación con O_3 trabajando como único agente oxidante, la diferencia radica en que el O_3 , por sí mismo, logra un gran porcentaje de degradación (95.49%) en comparación con los otros experimentos, puesto que necesitan de ciertas combinaciones para lograr resultados similares al O_3 y esto solo radica en una pequeña diferencia de entre 0.26-0.45%, por tanto para la parte de elaboración de tablas y gráfica de resultados finales se emplearon los datos arrojados de O_3 por un periodo de tratamiento de 60 minutos.

Tabla 16. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 60 minutos.

Reactor Batch Prueba con O ₃ (400 mg/h), 0.0601 g de Naranja de Metileno/500 ml de agua				
Tiempo	Absorbancia 460 nm	pH	%	Concentración en ppm
0	3.015	7.15	0%	120
10	1.816	7.1	39.76%	72.278
20	1.550	7.04	48.59%	61.691
30	1.392	6.99	53.83%	55.403
40	0.823	6.92	72.70%	32.756
50	0.245	6.93	91.87%	9.751
60	0.136	6.93	95.48%	5.413

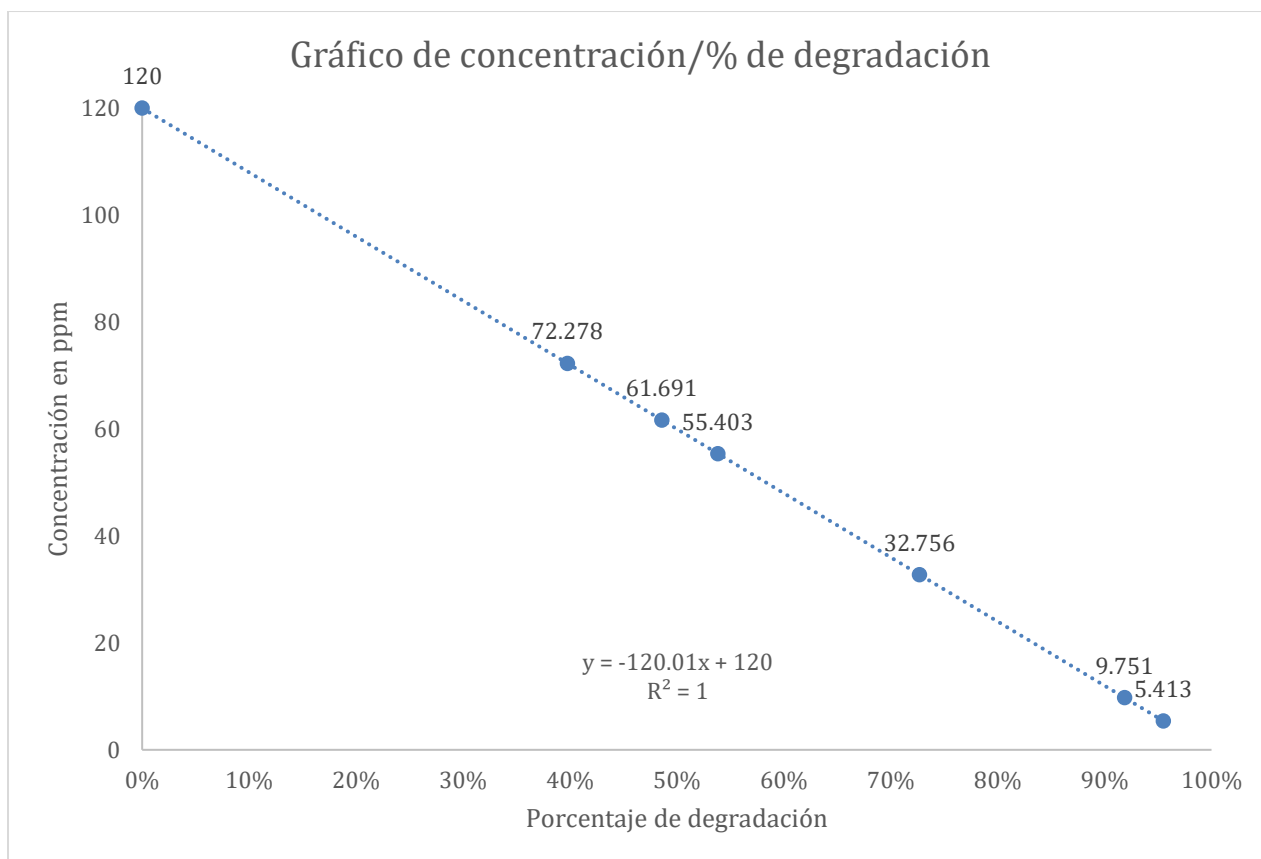


Figura 21. Representación del % de degradación del colorante naranja de metileno en comparación con la concentración.

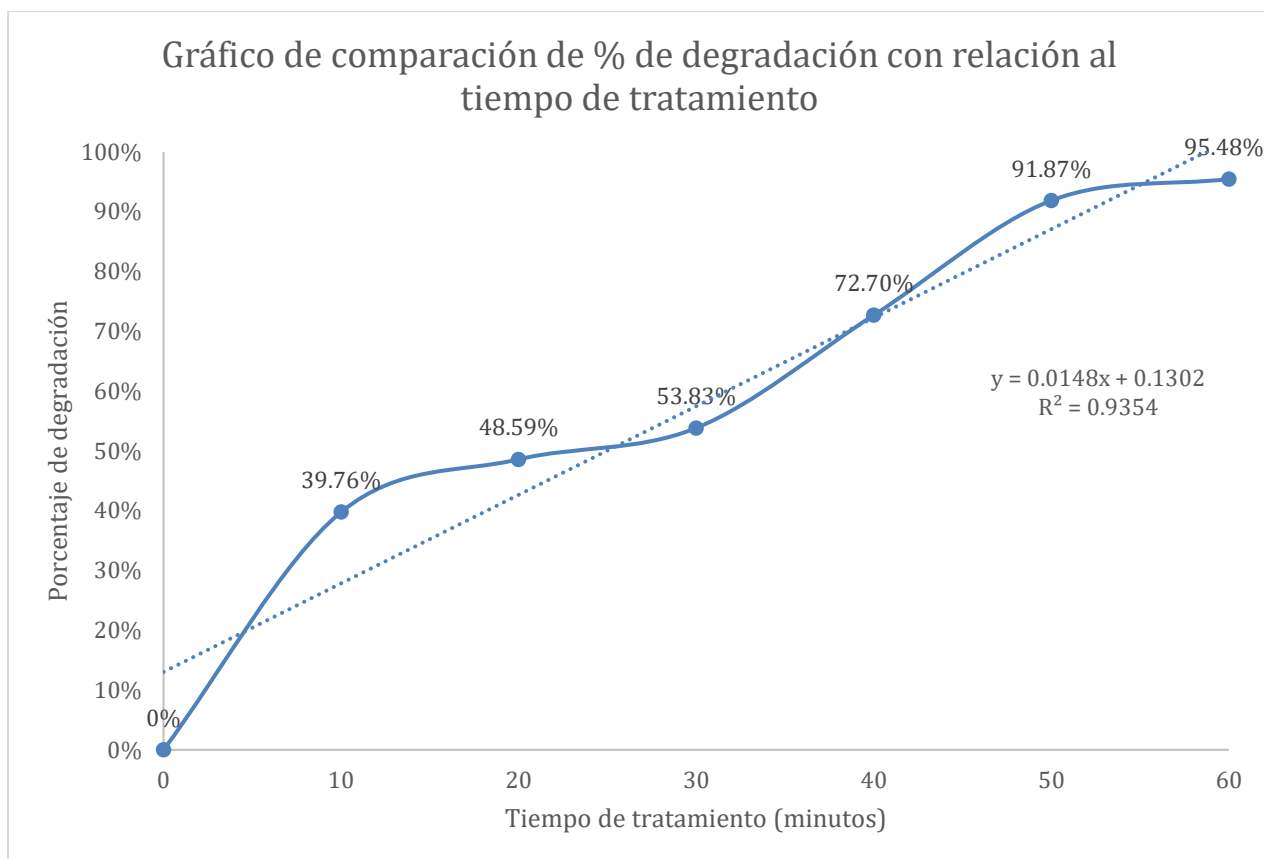


Figura 22. Representación del % de degradación del colorante naranja de metileno con relación al tiempo de tratamiento.

En la Figura 21 se representa el % de degradación del colorante naranja de metileno en comparación con la concentración al cabo del tiempo de reacción de 60 minutos, esto mediante la absorbancia obtenida a partir de espectrofotometría UV-VIS de cada una de las muestras tomadas cada 10 minutos, lo cual nos permite observar el comportamiento del proceso al paso del tiempo, dicho comportamiento con respecto al tiempo, en la Figura 22 se representa el % de degradación del colorante naranja de metileno con relación al tiempo de tratamiento de 60 minutos.

En la Figura 23 se muestran los viales con muestra al cabo del tiempo de reacción, cada muestra tomada a los 10 minutos, iniciando de 0 a 60 minutos de izquierda a derecha y presentando la decoloración del contaminante al paso del tiempo empleando O_3 como agente oxidante con una dosis de 400 mg/h.

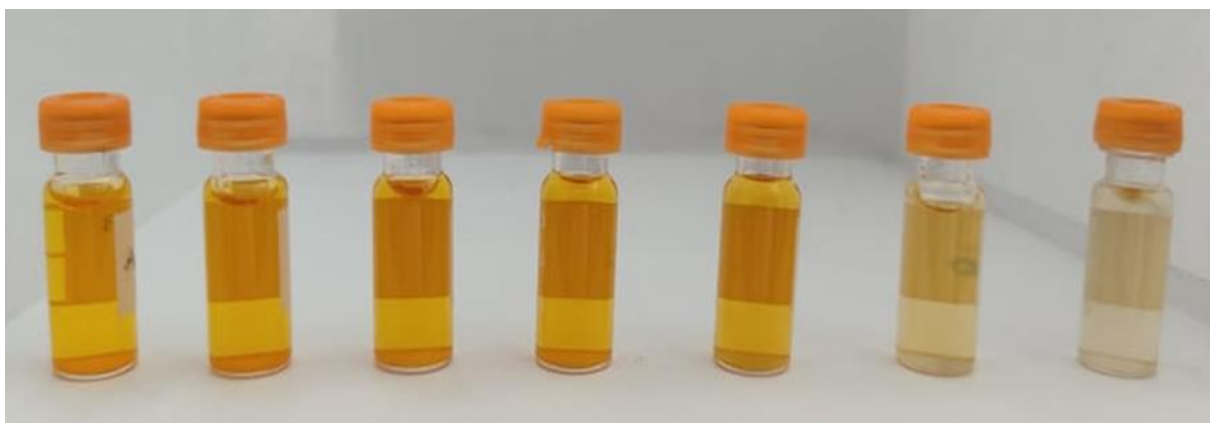


Figura 23. Representación de muestras de tratamiento con O_3 a dosis de 400 mg/h al cabo de 60 minutos.

Conclusiones, recomendaciones

1. Conclusiones

Los POA's se basan en la generación de radicales hidroxilos para la degradación del contaminante, en este caso, colorante naranja de metileno, algunos agentes oxidantes otorgan un excelente resultado de manera autónoma trabajando por sí solos, en comparación con otras combinaciones donde son requeridos 3 o más agentes oxidantes durante el proceso para lograr un resultado similar, tal es el caso de las combinaciones TiO_2 (0.25 gr) / O_3 (400 mg/h) / UV / H_2O_2 (2 ml) y TiO_2 (0.25 gr) / O_3 (400 mg/h) / UV / H_2O_2 (1 ml), donde el % de degradación varía entre un 0.25-0.45% más que el O_3 como único agente oxidante, pero en este caso se debe considerar el gasto de energía, reactivos, acondicionamiento del reactor, etc., por lo cual podemos concluir que en ocasiones algunas combinaciones, a pesar que su % de degradación sea un poco más alto, el utilizar O_3 nos garantiza un resultado en cuanto a % de degradación similar, ahorrando de esta manera recursos, energía, tiempo e incluso capital monetario, es por ello que en este trabajo de investigación se analizaron las posibles combinaciones de agentes oxidantes así como sus dosis, resultando el O_3 como el mejor agente oxidante con un % de degradación del 95.49% a una dosis de 400 mg/h, dicho lo anterior se replicó el experimento con O_3 a una dosis de 400 mg/h usando colorantes grado reactivo (Tartrazina y Cristal Violeta) y analítico (colorantes comerciales Caballito Café Tabaco, Rojo Granada y Negro Mezclilla) dando como resultados un porcentaje de degradación similar al Naranja de Metileno: Tartrazina = 99.78%, Cristal Violeta = 94.08%, Café Tabaco = 100%, Rojo Granada = 100%, Negro Mezclilla = 93.21%.

2. Recomendaciones.

Al finalizar el proceso durante 60 minutos medir con tiras reactivas de H_2O_2 la concentración en la muestra, puesto que una vez terminado el proceso es muy probable que la reacción continúe con el H_2O_2 residual, generando que la degradación pueda aumentar en cierto % y la eliminación del color en la muestra continúe al cabo de unos minutos más.

Fuentes de Información

- Alarcón, H. & Ramírez, M. (2021). "Películas delgadas de ZnSe modificadas con Fe^{2+} y Cu^{2+} para la fotoelectrocatalisis de anaranjado de metilo con especies activas de cloro". Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Rev. Soc. Quím. Perú. 87(1) 2021.
- Assis, J.; Pastre, L. & Silva, M. (2019). "Recuperación de resinas polifuncionales para purificación del agua: estudios adsorptivos con azul de metileno y naranja de metilo". Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Uruguay. INNOTECH, núm. 17, 2019 Junio, pp. 47-56.
- Berber, S.; Bernal, L.; Delgado, D.; Espinosa, Á.; Hernández, K. & Martínez, E. (2017). "Remoción del colorante compuesto naranja remazol de aguas residuales generadas en la industria textil". Executive Business School. La Serena, Chile. Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 8, núm. 3, julio, 2017, pp. 51-57.
- Castellanos, N.; Cortez, H.; Gómez, S. & Rodríguez, J. (2021). "Fotocatálisis heterogénea para la degradación de la orto-nitroanilina y la meta-nitroa". Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales-INCIAM, Química, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):300-312.
- Deza, E.; Manrique, J. & Osorio, A. (2017). "Evaluación experimental de la degradación fotocatalítica del colorante Cibacron NAVY H-2G empleando nanopartículas industriales de TiO_2 ". Sociedad Química del Perú, Lima, Perú. Revista de la Sociedad Química del Perú, vol. 83, núm. 2, abril-junio, 2017, pp. 160-173.
- Levenspiel, O. (2004). Ingeniería de las reacciones químicas. (Segunda ed). Barcelona, España. Editorial Reverte.
- Lizarazo, M. C. & Orduz, L. M. (2016). "Descomposición fotocatalítica de naranja de metileno sobre nanocompuestos de nanotubos de carbono/ TiO_2 -N". Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Bucaramanga.

Anexos

Pruebas adicionales a colorantes

Los siguientes resultados son de los colorantes Tartrazina, Cristal Violeta y colorantes grado analítico (colorante comercial caballito), para los cuales se determinó su eficiencia (% de degradación) con la ecuación:

$$\% = \frac{\text{Absorbancia inicial} - \text{Absorbancia en tiempo } t}{\text{Absorbancia Inicial}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Tabla 17. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 60 minutos a colorante Tartrazina.

Reactor Batch Prueba con O ₃ (400 mg/h), 0.0603 g de Tartrazina/500 ml de agua			
Tiempo	Absorbancia 430 nm	pH	%
0	1.394	6.71	0%
10	0.129	7.25	90.74%
20	0.014	7.26	98.99%
30	0.004	7.3	99.71%
40	0.003	7.29	99.78%
50	0.003	7.28	99.78%
60	0.003	7.3	99.78%

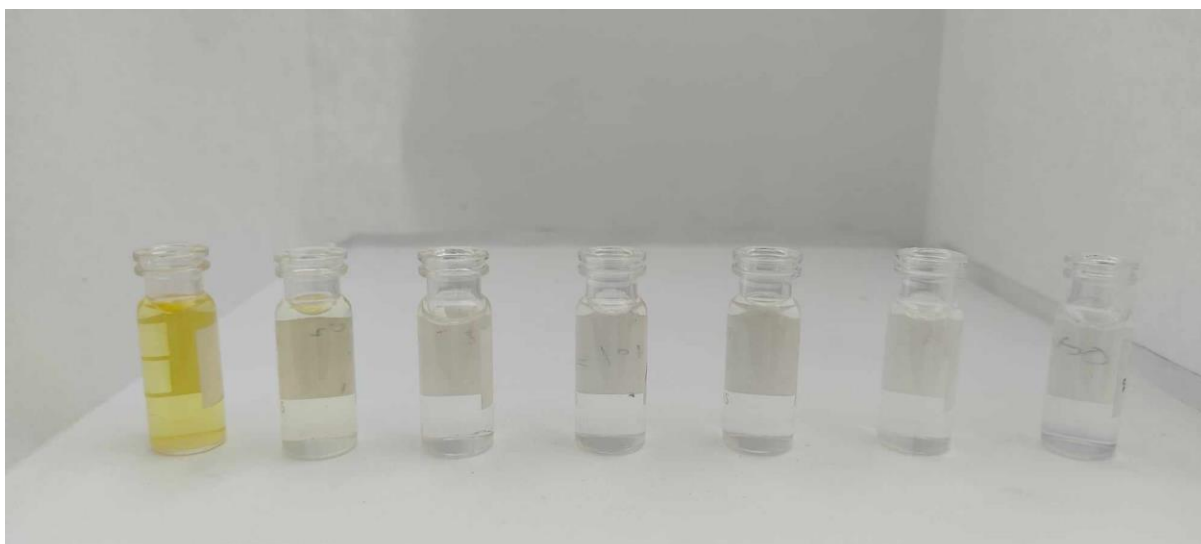


Figura 24. Representación de muestras de Tartrazina en tratamiento con O₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 60 minutos.

Tabla 18. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 60 minutos a colorante Cristal Violeta.

Reactor Batch Prueba con O ₃ (400 mg/h), 0.0603 g de Cristal Violeta/500 ml de agua			
Tiempo	Absorbancia 590 nm	pH	%
0	3.5	7.22	0%
10	2.775	7.34	20.71%
20	1.002	7.38	71.37%
30	0.531	7.39	84.82%
40	0.359	7.5	89.74%
50	0.259	7.47	92.60%
60	0.207	7.45	94.08%

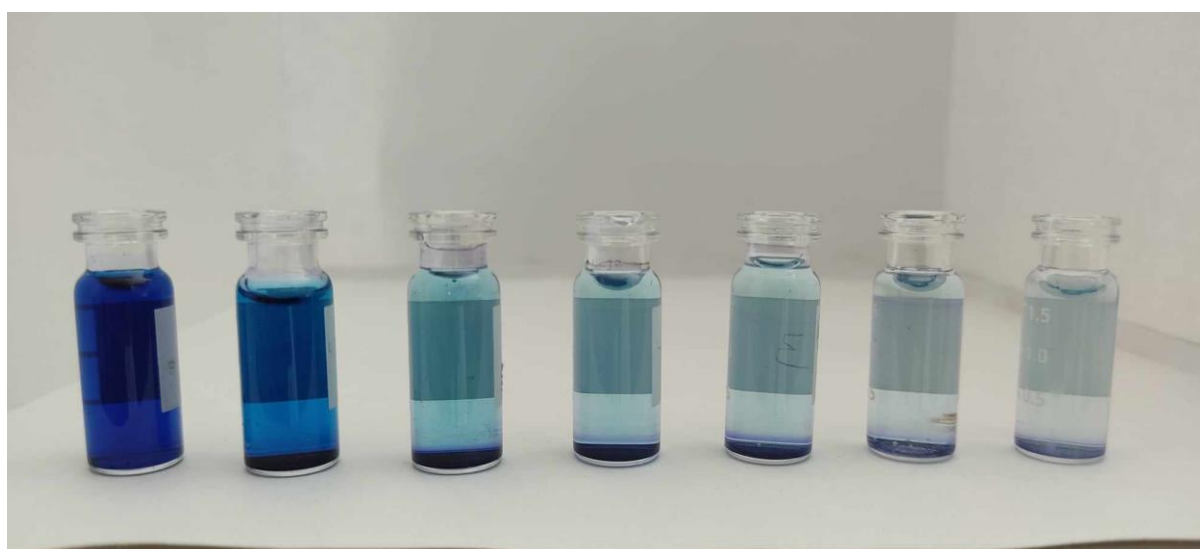


Figura 25. Representación de muestras de Cristal Violeta en tratamiento con O₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 60 minutos.

Tabla 19. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 20 minutos a colorante analítico Caballito Café Tabaco.

Reactor Batch Prueba con O ₃ (400 mg/h), 0.0603 g de colorante analítico Caballito Café Tabaco /500 ml de agua			
Tiempo	Absorbancia 471 nm	pH	%
0	0.227	7.58	0%
10	0.012	7.58	94.71%
20	0.000	7.55	100%

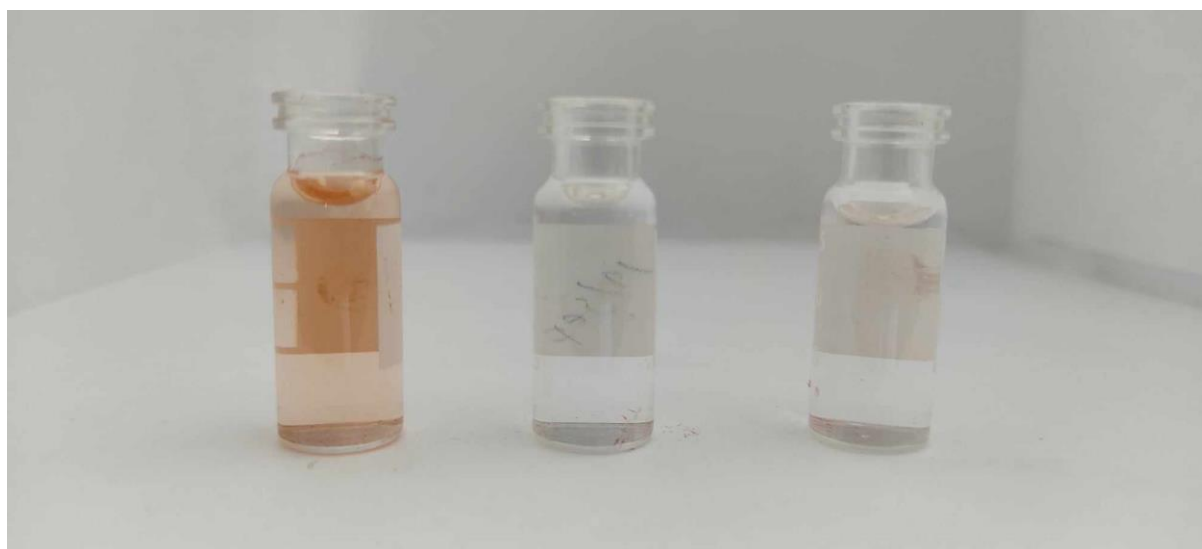


Figura 26. Representación de muestras de colorante analítico Caballito Café Tabaco en tratamiento con O₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 20 minutos.

Tabla 20. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 30 minutos a colorante analítico Caballito Rojo Granada.

Reactor Batch Prueba con O ₃ (400 mg/h), 0.0603 g de colorante analítico Caballito Rojo Granada /500 ml de agua			
Tiempo	Absorbancia 500 nm	pH	%
0	0.373	7.56	0%
10	0.035	7.64	90.61%
20	0.000	7.59	100%
30	0.000	7.6	100%

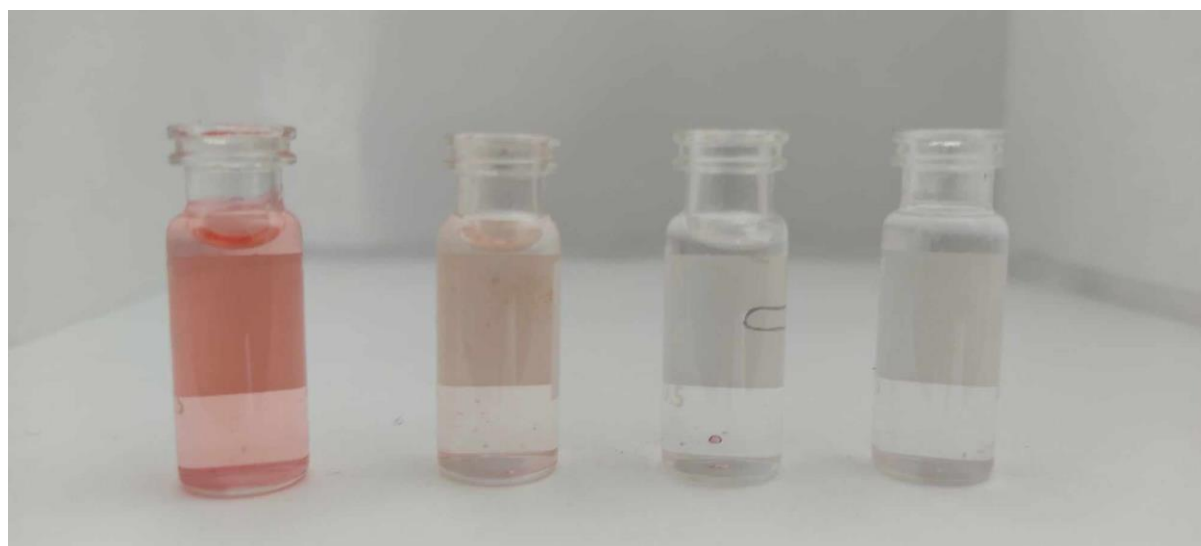


Figura 27. Representación de muestras de colorante analítico Caballito Rojo Granada en tratamiento con O₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 30 minutos.

Tabla 21. Datos de experimento O₃ con dosis 400 mg/h en reactor tipo *Batch* por tiempo de reacción de 60 minutos a colorante analítico Caballito Negro Mezclilla.

Reactor Batch Prueba con O ₃ (400 mg/h), 0.0603 g de colorante analítico Caballito Negro Mezclilla /500 ml de agua			
Tiempo	Absorbancia 480 nm	pH	%
0	0.280	7.59	0%
10	0.076	7.64	72.85%
20	0.042	7.68	85.00%
30	0.026	7.7	90.71%
40	0.020	7.7	92.85%
50	0.019	7.72	93.21%
60	0.019	7.7	93.21%



Figura 28. Representación de muestras de colorante analítico Caballito Negro Mezclilla en tratamiento con O₃ a dosis de 400 mg/h al cabo de 60 minutos.