

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**OPCIÓN IX
TESIS**

**TRATAMIENTOS DE MICROCONTAMINANTES PRESENTES EN AGUA
APLICANDO METODOS HOMOGÉNEOS Y HETEROGÉNEOS DE
OXIDACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA

MARIA GUADALUPE YAÑEZ DIAZ

**DIRECTORA:
DRA. BETHSABET JARAMILLO SIERRA**

AGOSTO 2025

Agradecimientos

A Dios, por darme la vida, la fuerza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa académica, guiando mis pasos incluso en los momentos de mayor dificultad.

A mi familia, que ha sido mi motor y refugio incondicional. A mis padres, a mi madre Oranda por su amor, sacrificio y el ejemplo de perseverancia que me ha inculcado; a mi hermano, por su apoyo y palabras de aliento; y especialmente a mis abuelitos Olga y J. Trinidad, por su cariño y por enseñarme el valor de la humildad y el esfuerzo.

A mi madrina Dani, por su apoyo constante, su confianza en mí y por estar presente no solo en los momentos de celebración, sino también en aquellos en los que más necesité ánimo y motivación para seguir adelante.

A mi novio Erik, por su paciencia, comprensión y respaldo en cada paso de este proceso, acompañándome con amor en los días de mayor presión y alentándome a no rendirme.

A mis profesores del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, quienes con sus enseñanzas, dedicación y exigencia académica contribuyeron a mi formación profesional. Agradezco de manera especial a aquellos que participaron directamente en este trabajo de investigación, por sus valiosos consejos, su disposición para resolver dudas y su compromiso en guiarme para alcanzar un resultado de calidad.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron apoyo, ánimo o inspiración durante este camino, gracias por formar parte de este logro que hoy puedo compartir con orgullo.

Índice

Resumen	13
Introducción.....	15
Planteamiento del problema.....	17
Justificación.....	19
Objetivos	22
Capítulo 1. Generalidades	23
1. Definición de microcontaminantes.....	24
1.1 Origen de los microcontaminantes en el agua	24
1.1.2 Clasificación de los microcontaminantes	25
1.2 Naproxeno.....	27
1.2.1 Diagrama estructural del Naproxeno.....	28

1.2.2 Efectos adversos del Naproxeno	29
1.3 Paracetamol	29
1.3.1 Diagrama estructural del Paracetamol	30
1.3.2 Efectos adversos del Paracetamol	31
1.4.1 Diagrama estructural de la Tartrazina	34
1.4.2 Efectos adversos de la Tartrazina	34
1.5 Fuentes y vías de entrada al medio acuático de los fármacos y colorantes	35
1.7 Impacto en la salud humana.....	37
1.8 Concentraciones típicas de microcontaminantes en cuerpos de agua de los fármacos y colorantes	38
1.9 Importancia del tratamiento de microcontaminantes en agua de los fármacos y colorantes	39
1.10 Métodos de Oxidación Avanzada.....	40

1.11 Procesos homogéneos y heterogéneos en los AOPS	40
1.12 Fundamentos de los métodos de oxidación homogénea y heterogénea	41
1.13 Comparación de métodos de tratamiento convencionales y métodos de oxidación avanzada	42
1.14 Desafíos y avances recientes en la eliminación de microcontaminante	44
2. Desarrollo experimental.....	47
2.1 Métodos y técnicas para la degradación de fármacos.....	47
2.2 Especificaciones de los materiales y reactivos utilizados durante el desarrollo experimental de los fármacos.....	48
2.2.1 Dispositivo experimental de los fármacos	52
2.2.2 Procedimiento.....	55
2.2.3 Preparación de la muestra sintética	57
2.2.4 Consideraciones adicionales	59

2.2.5 Selección del método de tratamiento	59
2.2.6 Caracterización de la muestra.....	61
2.3 Métodos y técnicas para la degradación de colorantes	62
2.3.1 Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs)	64
2.3.2 Especificación de los materiales y reactivos utilizados durante el desarrollo experimental del colorante.....	65
2.3.3 Dispositivo experimental del colorante	68
2.3.4 Procedimiento experimental de la Tartazina.....	70
2.3.5. Preparación de la muestra sintética	72
2.3.6 Condiciones y tiempos de análisis	73
2.3.7 Selección del método de tratamiento	74
3. Resultados y discusión	79
3.1 Degradación de los fármacos.....	79

3.1.1. Efecto de la radiación UV.....	79
3.1.2 Efecto del ozono (O_3)	80
3.1.3 Efecto del peróxido de hidrógeno (H_2O_2)	82
3.1.4 Efecto combinado de UV y ozono (UV/O_3)	83
3.1.5 Efecto Combinado de UV, ozono y peróxido de hidrógeno ($UV/O_3/H_2O_2$).....	84
3.1.6 Variación del pH	86
3.2 Degradación del Colorante	88
3.2.1 Efecto del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en la degradación de Tartrazina	88
3.2.2 Efecto del sistema H_2O_2/UV en la degradación de Tartrazina	91
3.2.3 Efecto del sistema combinado $O_3/H_2O_2/UV$ en la degradación de Tartazina.....	94
3.2.4 Variación de la coloración de las muestras de Tartrazina.....	99

Conclusiones	101
Recomendaciones.....	102
Referencias	104
Anexos	114
Determinación de la curva de calibración	114
Importancia de la curva de calibración en el análisis	116

Desarrollo de la experimentación

“El presente trabajo de investigación fue desarrollado en el laboratorio de Análisis Instrumental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco”

“No podemos tener éxito si el agua que usamos para sobrevivir está contaminada”

Ban Ki-moon

Resumen

En el presente estudio se investigó la degradación de tres microcontaminantes clave: naproxeno, paracetamol y el colorante tartrazina, mediante la aplicación de diversos Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs). Las tecnologías empleadas incluyeron irradiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), la combinación UV/ H_2O_2 , y el sistema combinado UV/ H_2O_2/O_3 . El objetivo principal fue determinar las condiciones óptimas para una degradación eficiente de estos compuestos.

Para los experimentos se utilizaron dos tipos de reactores: uno de flujo continuo para los fármacos y otro tipo batch para el colorante. Ambos reactores, de configuración cilíndrica y contruidos en acero inoxidable, permitieron un control preciso durante el tratamiento. Las concentraciones iniciales fueron de 0.0375 mg/L para los fármacos y 80 mg/L para el colorante, con volúmenes de trabajo de 800 mL y 500 mL, respectivamente, durante 60 minutos. Las muestras se analizaron cada 10 minutos para evaluar la evolución del proceso.

Los resultados mostraron altas eficiencias de degradación: 82 % para naproxeno, 98 % para paracetamol y 99 % para tartrazina (utilizando 15 ppm en el sistema UV/ H_2O_2/O_3). Visualmente, las soluciones se tornaron incoloras entre los 30 y 40 minutos, evidenciando la efectividad de los tratamientos aplicados.

Palabras clave: agua, colorantes, contaminación, fármacos, procesos de oxidación avanzada, tratamiento.

Abstrac

This study investigates the degradation of three key microcontaminants: naproxen, paracetamol, and the dye tartrazine, through the application of various Advanced Oxidation Processes (AOPs). The technologies employed included ultraviolet (UV) irradiation, hydrogen peroxide (H_2O_2), the UV/ H_2O_2 combination, and the

UV/H₂O₂/O₃ combined system. The main objective was to determine the optimal conditions for effective degradation.

Two types of reactors were used: a continuous-flow reactor for the pharmaceuticals and a batch-type reactor for the dye. Both reactors, cylindrical and made of stainless steel, enabled precise control of the treatment. The initial concentrations were 0.0375 mg/L for the pharmaceuticals and 80 mg/L for the dye, with volumes of 800 mL and 500 mL, respectively, during a 60-minute treatment period. Samples were analyzed every 10 minutes to monitor process progression.

The results showed high degradation efficiencies: 82% for naproxen, 98% for paracetamol, and 99% for tartrazine (with 15 ppm in the UV/H₂O₂/O₃ system). Qualitatively, the solutions became colorless between 30 and 40 minutes, indicating the effectiveness of the applied treatments.

Keywords: water, dyes, contamination, pharmaceuticals, advanced oxidation processes, treatment.

Introducción

El agua es un recurso esencial para la supervivencia de todos los seres vivos, por lo que su conservación y tratamiento son de vital importancia a nivel global. Sin embargo, uno de los mayores desafíos en este ámbito es la contaminación del agua, ocasionada tanto por agentes naturales como antropogénicos, siendo estos últimos los de mayor impacto. Esta contaminación genera graves consecuencias, entre las que destacan problemas de salud pública, daños a los ecosistemas acuáticos, y la escasez de agua potable.

Los contaminantes presentes en el agua tienen orígenes y características diversas. En la última década, ha aumentado el interés por los llamados contaminantes emergentes, que se caracterizan por encontrarse en bajas concentraciones en los cuerpos de agua, lo que inicialmente los hizo pasar desapercibidos para su estudio y regulación. No obstante, se ha demostrado que muchos de estos contaminantes son bioacumulables, afectando negativamente a los seres vivos. Entre ellos destacan los fármacos, sustancias empleadas con fines terapéuticos, diagnósticos o preventivos, que, al ser metabolizadas o desechadas sin un tratamiento adecuado, ingresan en los sistemas de aguas residuales domésticas y hospitalarias, generando un problema de salud pública (Barroso et al., 2020).

El paracetamol y el naproxeno son dos de los fármacos más utilizados a nivel mundial. Ambos son antiinflamatorios no esteroideos y antipiréticos, disponibles sin receta médica, lo que hace que su uso no esté controlado. Su presencia en cuerpos de agua puede provocar efectos tóxicos, como daños gastrointestinales, insuficiencia hepática y potencial hepato-toxicidad. Aunque las plantas de tratamiento de aguas residuales se utilizan para mitigar la contaminación por fármacos, se ha comprobado que no son completamente eficaces o requieren largos tiempos de tratamiento. Por esta razón, es fundamental implementar tecnologías alternativas. Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) han demostrado ser una opción viable, ya que generan especies químicas activas capaces de degradar e incluso mineralizar estos contaminantes (Cuerda, 2020).

En este estudio, se evaluó la degradación individual de paracetamol y naproxeno mediante la aplicación de diversos Procesos de Oxidación Avanzada (POA), con el objetivo de determinar los parámetros óptimos que maximicen la eficiencia de degradación para cada compuesto.

Adicionalmente, se trabajó con el colorante tartrazina, un compuesto azoico ampliamente utilizado en la industria alimentaria. Como contaminante, la tartrazina afecta negativamente los cuerpos de agua, alterando sus propiedades organolépticas, disminuyendo el oxígeno disuelto y afectando la capacidad fotosintética de las plantas acuáticas. Estos efectos adversos también repercuten en la fauna acuática (Morillo, 2019).

Los colorantes, ya sean de origen natural o sintético, se utilizan en industrias como la textil, cosmética, alimentaria y médica. Se caracterizan por poseer estructuras moleculares complejas y diversos grupos funcionales, lo que los convierte en compuestos recalcitrantes y resistentes a los métodos convencionales de tratamiento (Pirsaheb, 2022). La dificultad en su degradación durante el tratamiento de aguas residuales subraya la necesidad de validar y aplicar métodos alternativos. Los Procesos de Oxidación Avanzada son tecnologías que, en las últimas décadas, se han utilizado para tratar contaminantes en agua a temperatura y presión atmosféricas, destacándose por la generación de radicales hidroxilo ($\text{OH}^\bullet$), especies altamente reactivas que se obtienen mediante la adición de agentes oxidantes y catalíticos, como la radiación ultravioleta, ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), reacciones Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) y fotocátalisis (Cuerda, 2020).

La degradación de contaminantes mediante estos métodos es posible gracias a reacciones químicas directas e indirectas, que pueden llevar a la completa mineralización de los compuestos.

Planteamiento del problema

Las fuentes de agua a nivel mundial —como ríos, lagos, acuíferos y mares— están siendo severamente afectadas por la contaminación derivada de actividades humanas, principalmente en los sectores industrial, agrícola, urbano y hospitalario. Esta situación representa una amenaza creciente para la salud humana, la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos. Entre los contaminantes emergentes más preocupantes destacan los productos farmacéuticos, cuya presencia creciente en cuerpos de agua ha generado alarma en la comunidad científica y en los organismos reguladores debido a sus efectos tóxicos y su persistencia ambiental.

Los medicamentos, ampliamente utilizados para tratar diversas afecciones, son consumidos en grandes cantidades, situación que se intensificó durante la reciente pandemia global. Una vez administrados, estos compuestos son metabolizados parcialmente por el organismo y luego excretados, ingresando a las aguas residuales. Además, el desecho inadecuado de medicamentos caducados, ya sea a través de la basura o por el sistema de drenaje, incrementa significativamente la carga contaminante. Dado que muchos de estos compuestos no se eliminan completamente en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), su presencia en cuerpos de agua superficial y subterránea es cada vez más frecuente (Weber et al., 2014).

En el contexto mexicano, las PTAR carecen, en su mayoría, de tecnología avanzada para remover contaminantes a concentraciones tan bajas como nanogramos por litro (ng/L). Esta limitación tecnológica plantea un desafío urgente para el desarrollo de procesos innovadores, económicos y sostenibles. Particularmente, las aguas residuales hospitalarias contienen fármacos, microorganismos resistentes, desinfectantes y hasta residuos radioactivos, lo que agrava la complejidad del tratamiento.

Por otro lado, los colorantes industriales, como la tartrazina, empleados en las industrias alimentaria, textil y cosmética, también representan una amenaza

ambiental importante. Estos compuestos afectan la calidad del agua al reducir la penetración de la luz solar, interfiriendo con procesos ecológicos esenciales como la fotosíntesis, y muchos de ellos tienen efectos tóxicos, mutagénicos y alergénicos (Sharma & Kundu, 2019).

Ante la limitada eficacia de los métodos convencionales, se han investigado tecnologías más eficaces, como los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs). Estos procesos, que combinan agentes oxidantes con radiación ultravioleta, han mostrado resultados prometedores para la eliminación de contaminantes recalcitrantes como fármacos y colorantes. No obstante, su implementación a gran escala aún requiere investigación experimental que determine sus condiciones óptimas y rentabilidad operativa.

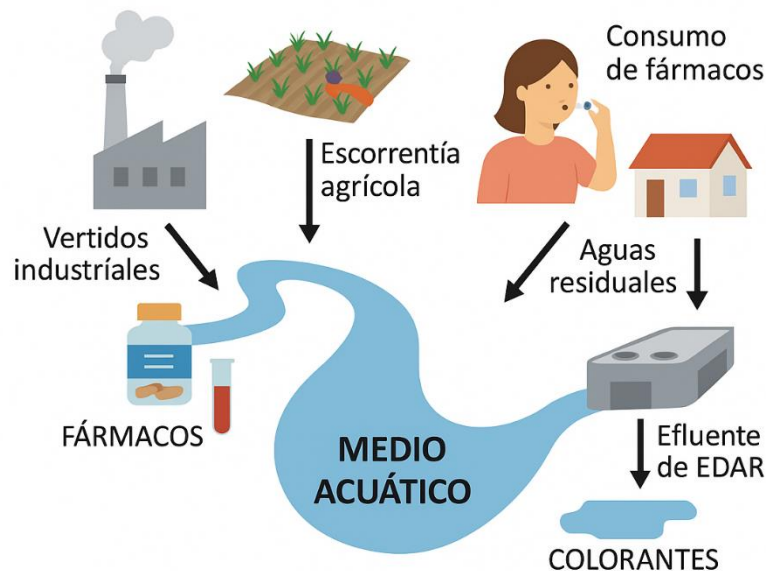


Figura 1 Vías de entrada de microcontaminantes al medio acuático.
Fuente : Adaptal de Kümmerer et al., 2018

Justificación

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define el agua contaminada como aquella cuya "composición ha sido modificada de tal forma que no cumple con las condiciones necesarias para el uso al que estaba destinada en su estado natural." En los últimos años, ha aumentado la preocupación entre los responsables de la gestión y administración del suministro de agua debido a la creciente cantidad de estudios que alertan sobre la presencia de productos farmacéuticos en los sistemas acuáticos naturales. Estos fármacos, administrados a humanos y animales por diversas vías (oral, inhalación, tópica, inyecciones, entre otras), se están detectando en cuerpos de agua superficiales en cantidades alarmantes.

Un número cada vez mayor de estudios ha demostrado que los productos farmacéuticos están presentes en el medio ambiente a nivel mundial. Según una revisión exhaustiva de más de 1000 publicaciones internacionales, se han identificado residuos farmacéuticos en 71 países, abarcando los cinco grupos regionales de las Naciones Unidas. Estas sustancias se han encontrado predominantemente en aguas superficiales y efluentes sanitarios, pero también han sido detectadas en aguas subterráneas, suelos, estiércol y otras matrices ambientales. Hasta la fecha, se han identificado más de 600 sustancias farmacéuticas activas (incluyendo sus metabolitos y productos de transformación) en el entorno, pertenecientes a diferentes grupos terapéuticos (Weber, 2014).

Los productos farmacéuticos son algunos de los principales contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales y pueden dispersarse en el suelo y el aire, dependiendo de las características del medio receptor. Una vez administrados, estos fármacos son absorbidos, distribuidos y metabolizados por los organismos, para luego ser excretados. La excreción, junto con el vertido incontrolado de medicamentos y la eliminación inadecuada de excedentes de fármacos en hogares y aplicaciones veterinarias, son las principales vías a través

de las cuales los productos farmacéuticos y otros compuestos persistentes llegan a las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Estudios realizados en plantas de tratamiento han demostrado que las tecnologías actuales no son completamente eficaces en la eliminación de estos compuestos (Pirsaheb, 2022). Como resultado, muchos de estos contaminantes terminan en las aguas superficiales, que a menudo son utilizadas como fuentes de agua potable. Dado que las plantas de tratamiento de agua potable tampoco pueden eliminar completamente estos productos, han comenzado a detectarse en concentraciones muy bajas en el agua destinada al consumo humano, lo que podría suponer riesgos para la salud pública a largo plazo.

Además de los fármacos, los colorantes también representan un desafío significativo como contaminante emergente en los tratamientos de aguas residuales. Estos compuestos se emplean en una amplia variedad de procesos industriales, incluidos los sectores textil, alimentario y cosmético. Un ejemplo destacado es la tartrazina, un colorante artificial ampliamente utilizado en la industria alimentaria y que pertenece a la familia de los colorantes azoicos. Este compuesto se utiliza para conferir tonos amarillos o anaranjados a los alimentos y bebidas, y en combinación con colorantes azules, se emplea para obtener tonos verdes.

La tartrazina ha sido ampliamente utilizada desde 1916 en productos de repostería, derivados cárnicos, sopas, conservas vegetales, salsas, helados, postres, caramelos y otras golosinas, así como en bebidas refrescantes de naranja y limón. Su uso está autorizado en más de sesenta países, incluidos Estados Unidos y los miembros de la Unión Europea. Debido a su amplio empleo en la industria alimentaria, su presencia en los cuerpos de agua se ha convertido en una preocupación significativa, ya que los métodos convencionales de tratamiento no son completamente efectivos para eliminarla.

Con base en esta problemática, en el presente estudio se llevó a cabo la degradación de contaminantes farmacéuticos como el paracetamol y el naproxeno, junto con el colorante tartrazina, en soluciones acuosas mediante la aplicación de diversos Métodos de Oxidación Avanzada (AOPs). Los agentes oxidantes utilizados incluyeron radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ozono (O_3), evaluándose tanto su eficacia individual como su efecto sinérgico en la degradación de estos compuestos. El objetivo fue determinar las condiciones óptimas para maximizar la eficiencia de degradación, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con estos compuestos persistentes.

Objetivos

Objetivo General

Aplicar diversos métodos de oxidación, tanto homogéneos como heterogéneos, para la eliminación de microcontaminantes (fármacos y colorantes) en soluciones acuosas, con el fin de determinar los parámetros óptimos que maximicen la eficiencia del proceso. El estudio incluirá el análisis de la concentración inicial de los agentes oxidantes, el pH y el tiempo de tratamiento.

Objetivos Específicos

- a) Acondicionar el reactor de tratamiento para la degradación de fármacos y colorantes en solución acuosa mediante la aplicación de diversos procesos de oxidación avanzada.
- b) Llevar a cabo la degradación de los fármacos y colorantes utilizando procesos de oxidación avanzada, como radiación UV, peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ozono (O_3) y sus combinaciones (H_2O_2 /UV, UV/ H_2O_2 / O_3).
- c) Evaluar la eficiencia de degradación de los contaminantes en solución acuosa.
- d) Establecer las condiciones óptimas para la degradación de los contaminantes y analizar el efecto del pH en el proceso.

Capítulo 1. Generalidades

1. Definición de microcontaminantes

Los microcontaminantes, también conocidos como contaminantes emergentes. Estos son compuestos, tanto naturales como sintéticos, que incluyen fármacos, productos de cuidado personal, pesticidas y sustancias industriales, y que se encuentran en concentraciones mínimas (desde partes por trillón hasta partes por billón) en cuerpos de agua, pero que aun así pueden presentar riesgos ambientales y para la salud humana (Azmi Aris et al., 2021; Dulio et al., 2021).

La presencia de microcontaminantes en el agua está directamente relacionada con actividades humanas, como el uso excesivo de fármacos y cosméticos y la aplicación de pesticidas en la agricultura. Estos compuestos, debido a su resistencia a los métodos convencionales de tratamiento de aguas, suelen ingresar al medio ambiente a través de sistemas de alcantarillado o escorrentías agrícolas, acumulándose en ríos, lagos y acuíferos. Sus efectos pueden incluir la alteración endocrina, la reducción de la fertilidad en organismos acuáticos y el incremento en la resistencia microbiana, aspectos que representan un desafío para los ecosistemas acuáticos y para la salud pública (Frontiers, 2021; Aris et al., 2021).

1.1 Origen de los microcontaminantes en el agua

Los orígenes de los microcontaminantes en el agua, resulta esencial destacar que estos compuestos incluyen una amplia gama de sustancias provenientes de diversas fuentes humanas y naturales. Los principales grupos son los productos farmacéuticos, pesticidas, productos de cuidado personal (PPCPs), y compuestos industriales. Según estudios, muchos de estos microcontaminantes llegan al agua a través de actividades de consumo doméstico, tratamientos inadecuados en plantas de aguas residuales y escorrentías agrícolas, cada uno aportando distintas clases de contaminantes (Solla, 2016; Sanderson, 2004).

Por ejemplo, los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), como antibióticos y cosméticos, se encuentran en el ambiente acuático porque no son completamente eliminados durante el tratamiento de aguas residuales, lo que

permite su llegada a ríos y otros cuerpos de agua. Estos PPCPs representan un riesgo biológico significativo, ya que incluyen disruptores endocrinos y componentes bioacumulativos que pueden alterar el equilibrio hormonal de especies acuáticas (Noguera y Aga, 2016; Frontiers, 2021).

Otro importante grupo son los pesticidas, que ingresan al agua principalmente por escorrentía desde terrenos agrícolas. Estos compuestos pueden persistir durante largos períodos, y su acumulación representa un problema considerable debido a su toxicidad para los organismos acuáticos y su potencial efecto en la salud humana a través del consumo de agua contaminada. El uso intensivo de pesticidas en la agricultura y su liberación a través de aguas pluviales exacerbó estos problemas, particularmente en áreas de cultivos intensivos (Carlsson, 2006; Luo, 2014).

Finalmente, los compuestos industriales, como disolventes y metales pesados, también figuran entre los microcontaminantes, debido a su amplio uso en procesos industriales y su posterior disposición inadecuada. Este tipo de sustancias puede incluir contaminantes como el bisfenol A y el DEHP, compuestos que, aunque regulados en algunos lugares, todavía representan un problema global de contaminación debido a su producción y uso extendidos (PLOS Water, 2023).

1.1.2 Clasificación de los microcontaminantes

Se basa principalmente en su origen y uso, lo cual permite entender mejor su impacto ambiental y su comportamiento en los ecosistemas acuáticos. Los microcontaminantes suelen agruparse en varias categorías clave: productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, pesticidas, compuestos industriales, microplásticos, y disruptores endocrinos.

Productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs)

Estos incluyen medicamentos y productos cosméticos que ingresan al agua a través del consumo humano y animal, y su eliminación. Los PPCPs son una preocupación emergente debido a su actividad biológica, que puede afectar a organismos

acuáticos, y su persistencia en el medio ambiente, acumulándose en concentraciones bajas pero significativas (Muhamad et al., 2021).

Pesticidas y herbicidas

Utilizados extensamente en la agricultura, estos químicos se filtran en cuerpos de agua a través de la escorrentía y la infiltración en el suelo. Estos contaminantes pueden causar problemas graves de salud en humanos y efectos tóxicos en la fauna acuática debido a su potencial persistencia y acumulación en organismos vivos (Nazifa et al., 2021).

Compuestos industriales

Los productos químicos industriales, como los retardantes de llama y otros compuestos sintéticos, suelen ser resistentes a la degradación y se acumulan en sedimentos acuáticos. Este tipo de contaminantes afecta la calidad del agua y representa riesgos para la salud y el ambiente debido a sus propiedades persistentes y tóxicas (Jamie et al., 2023).

Microplásticos

Estos diminutos fragmentos de plástico, producto de la degradación de objetos mayores, son otra categoría importante de microcontaminantes. Se encuentran en cuerpos de agua, suelo y aire, afectando a los ecosistemas y potencialmente la salud humana, ya que pueden contener y liberar sustancias tóxicas al medio ambiente (The Pharma Innovation Journal, 2021).

Disruptores endocrinos

Este grupo incluye químicos que alteran el sistema hormonal de los seres vivos, como algunos productos industriales y pesticidas. Estos disruptores pueden afectar el desarrollo y la reproducción de organismos acuáticos y se consideran una amenaza para la salud pública y los ecosistemas (Nazifa et al., 2021).

Cada categoría de microcontaminantes presenta desafíos únicos en su detección, eliminación y tratamiento, debido a su variabilidad en la estructura química y en el impacto ambiental. La gestión adecuada y la investigación continua en sus efectos y tratamientos específicos son esenciales para minimizar su impacto en el agua y en la salud humana.

1.2 Naproxeno

El naproxeno, un antiinflamatorio no esteroideo (AINE) comúnmente utilizado para el tratamiento del dolor y la inflamación, ha ganado atención como contaminante emergente en cuerpos de agua debido a su persistencia y efectos ecotoxicológicos. Se encuentra ampliamente en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que los métodos convencionales de tratamiento no logran eliminarlo por completo (García-Galán et al., 2019). Este fármaco entra en el ambiente acuático principalmente a través de excreciones humanas, que llegan a sistemas de aguas residuales, y a través de vertidos hospitalarios e industriales. Las concentraciones de naproxeno en cuerpos de agua pueden variar, pero estudios indican que niveles tan bajos como unos pocos microgramos por litro pueden impactar negativamente a organismos acuáticos sensibles (Fernández et al., 2020).

Una de las principales preocupaciones asociadas con el naproxeno en el ambiente acuático es su capacidad para actuar como disruptor endocrino. Algunos estudios han reportado que la exposición a bajas concentraciones de este compuesto afecta la reproducción y el desarrollo en peces y otros organismos acuáticos, alterando la homeostasis hormonal y, potencialmente, la estructura de las poblaciones (Pérez et al., 2021). Además, el naproxeno es resistente a la biodegradación, lo cual contribuye a su persistencia y acumulación en ecosistemas acuáticos, así como a su potencial de bioacumulación en la cadena trófica, representando un riesgo no solo para la fauna acuática, sino también para la salud humana (Barbosa et al., 2022).

La experimentación se enfoca en el tratamiento de microcontaminantes como el naproxeno mediante métodos de oxidación avanzada, debido a su ineficaz eliminación en plantas de tratamiento convencionales. Los procesos de oxidación avanzada (AOPs), que incluyen métodos homogéneos como el uso de ozono y peróxido de hidrógeno, y métodos heterogéneos como la fotocatalisis, han mostrado ser prometedores en la degradación de compuestos farmacéuticos. Estos métodos pueden generar radicales altamente reactivos que degradan eficientemente el naproxeno en compuestos menos tóxicos y más fácilmente biodegradables, abordando así su persistencia y reduciendo su impacto ambiental (Rivas et al., 2021).

1.2.1 Diagrama estructural del Naproxeno

La estructura química del naproxeno es $C_{14}H_{14}O_3$, y su nombre IUPAC es ácido (S)-2-(6-metoxi-2-naftil) propanoico. Pertenece a la clase de los ácidos arilpropiónicos, un grupo común entre los antiinflamatorios no esteroideos (AINEs). En la **Figura 2** se observa su estructura, la cual presenta un anillo naftaleno con un grupo metoxi ($-OCH_3$) en la posición 6 y un grupo carboxílico ($-COOH$) en la cadena lateral, que le confiere sus propiedades analgésicas y antiinflamatorias.

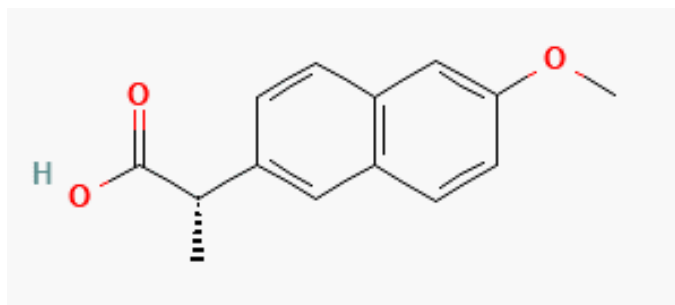


Figura 2 Naproxeno. **Fuente:** National Center for Biotechnology Information. (2024). *Naproxen* (CID=156391). PubChem.

La orientación y características de estos grupos funcionales hacen que el naproxeno sea eficaz en la inhibición de enzimas ciclooxigenasas (COX-1 y COX-2), que participan en la producción de prostaglandinas, mediadores de la inflamación y el dolor.

1.2.2 Efectos adversos del Naproxeno

Cuando se emplea de forma prolongada o en altas dosis. Entre los efectos secundarios más frecuentes están los problemas gastrointestinales, como náuseas, dispepsia, dolor abdominal y, en casos graves, úlceras o hemorragias gástricas, las cuales pueden llegar a ser fatales, sobre todo en personas mayores. Este riesgo aumenta con el consumo de alcohol y ciertos medicamentos, como otros AINEs y anticoagulantes (Mayo Clinic, 2024; Drugs.com, 2024).

Además, el uso de naproxeno puede afectar al sistema cardiovascular, elevando el riesgo de eventos como hipertensión, ataques cardíacos y, en raras ocasiones, insuficiencia cardíaca. El sistema renal también puede verse comprometido, con posibilidades de insuficiencia renal y nefritis intersticial, especialmente en personas con enfermedades preexistentes de riñón o que utilizan el medicamento a largo plazo (Mayo Clinic, 2024).

Efectos secundarios en el sistema nervioso incluyen cefaleas, mareos, y en menor medida, problemas cognitivos y somnolencia. También se han reportado reacciones de hipersensibilidad que pueden desencadenar desde erupciones cutáneas hasta reacciones anafilácticas graves (Drugs.com, 2024). Estos efectos destacan la importancia de administrar naproxeno bajo la supervisión médica y de monitorear posibles interacciones y efectos adversos para minimizar riesgos.

1.3 Paracetamol

El paracetamol, uno de los analgésicos y antipiréticos más comúnmente utilizados, se ha convertido en un contaminante frecuente en cuerpos de agua debido a su amplia utilización y excreción. Este fármaco ingresa al ambiente acuático a través

de efluentes de aguas residuales, en gran medida por la excreción humana y el desecho inadecuado de medicamentos. Las plantas de tratamiento de aguas residuales tradicionales no logran eliminar por completo el paracetamol, lo que provoca su persistencia en el ambiente acuático (Patel et al., 2019).

La presencia de paracetamol en cuerpos de agua plantea varios problemas ecológicos y de salud pública. A concentraciones incluso muy bajas, el paracetamol puede ser tóxico para organismos acuáticos, afectando su reproducción y desarrollo. Algunos estudios han demostrado que, en ciertas especies de peces y plantas acuáticas, el paracetamol puede inducir estrés oxidativo, alterar procesos enzimáticos y, en algunos casos, causar daños al ADN (Smith et al., 2021). Además, el paracetamol es susceptible a la fotodegradación en condiciones naturales, lo que da lugar a la formación de subproductos que pueden ser incluso más tóxicos que el compuesto original, exacerbando su riesgo ambiental (Jones et al., 2020).

Dado que el paracetamol es resistente a la degradación biológica en las plantas de tratamiento convencionales, se requieren métodos avanzados para su eliminación. Los procesos de oxidación avanzada (AOPs) representan una solución prometedora. Estos procesos, que incluyen la aplicación de ozono, radiación UV y peróxido de hidrógeno, son capaces de generar radicales hidroxilo altamente reactivos, que atacan la estructura química del paracetamol, reduciendo su toxicidad y facilitando su biodegradación (Chen et al., 2022). Los métodos de oxidación homogéneos y heterogéneos aplicados en este tipo de experimentación permitirán evaluar la eficiencia en la eliminación de paracetamol y la reducción de su impacto ambiental.

1.3.1 Diagrama estructural del Paracetamol

La estructura química del paracetamol, cuyo nombre IUPAC es N-acetil-p-aminofenol o acetaminofén, tiene la fórmula molecular $C_8H_9NO_2$. En la **Figura 3** se observa que se compone de un anillo bencénico con un grupo hidroxilo (-OH) y un

grupo amida (-NHCOCH₃) en posiciones opuestas, dándole una estructura simétrica.

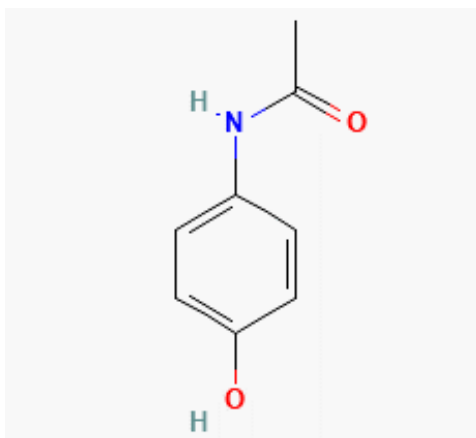


Figura 3 Paracetamol. **Fuente:** National Center for Biotechnology Information. (2024). *Paracetamol* (CID=1983). PubChem.

El paracetamol pertenece a la clase de las fenacetinas y tiene propiedades analgésicas y antipiréticas, aunque se desconocen por completo sus mecanismos de acción exactos. Se cree que actúa inhibiendo la síntesis de prostaglandinas en el sistema nervioso central.

1.3.2 Efectos adversos del Paracetamol

También conocido como acetaminofén, es uno de los analgésicos y antipiréticos más empleados en el mundo debido a su efectividad y disponibilidad. Sin embargo, su uso, especialmente en dosis elevadas o durante largos periodos, está asociado con una variedad de efectos adversos, particularmente en el hígado, los riñones y, en casos específicos, el sistema cardiovascular.

Uno de los efectos más significativos y estudiados del paracetamol es su toxicidad hepática. En dosis terapéuticas, el paracetamol se metaboliza principalmente en el hígado, donde se convierte en metabolitos inactivos que se eliminan por los riñones. Sin embargo, cuando se consumen dosis altas o en combinación con alcohol, el

hígado no puede procesarlo completamente, lo que lleva a la formación de un metabolito tóxico llamado N-acetil-p-benzoquinona imina (NAPQI) (Lee, 2019). Este metabolito puede causar necrosis en las células hepáticas, lo que conduce a daño hepático agudo y, en casos graves, a insuficiencia hepática (Heard, 2020). Según Lee (2019), la sobredosis de paracetamol es una de las principales causas de fallo hepático en numerosos países.

Además del daño hepático, el paracetamol también presenta riesgos para el sistema renal. Varios estudios sugieren que el uso crónico y a dosis altas de este fármaco puede contribuir al desarrollo de nefropatía, una enfermedad progresiva del riñón que afecta su capacidad para filtrar toxinas (Roberts et al., 2021). El efecto nefrotóxico se atribuye a la acumulación de metabolitos del paracetamol en el riñón, lo cual genera estrés oxidativo y daño en el tejido renal. Recientemente, investigaciones también han señalado un posible vínculo entre el uso frecuente de paracetamol y un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares. Aunque el mecanismo subyacente aún se estudia, algunos expertos plantean que el uso prolongado puede incrementar la presión arterial, lo cual representa un factor de riesgo para enfermedades del corazón (Dunn et al., 2022).

Existe evidencia de que el consumo de paracetamol durante el embarazo podría tener efectos adversos en el desarrollo fetal. Estudios recientes han asociado el uso prolongado de este medicamento en mujeres embarazadas con un posible aumento del riesgo de trastornos en el neurodesarrollo, como el déficit de atención e hiperactividad (ADHD) en los niños (Bauer et al., 2021). Sin embargo, estos hallazgos aún son preliminares y requieren mayor investigación para confirmar la relación causal.

1.4 Tartazina

Un colorante sintético de color amarillo ampliamente utilizado en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, es uno de los compuestos azoicos más comunes que se encuentran en cuerpos de agua contaminados. Este colorante,

debido a su estructura química resistente y su alta solubilidad, representa un desafío para las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales. Cuando la tartrazina llega a los sistemas acuáticos a través de efluentes industriales, suele persistir en el medio ambiente, donde puede afectar tanto a los ecosistemas como a la salud humana (Hussain et al., 2021).

Desde una perspectiva ecológica, la presencia de tartrazina en cuerpos de agua puede resultar en una disminución en la calidad del agua debido a su coloración, lo cual reduce la penetración de la luz solar, afectando procesos biológicos esenciales como la fotosíntesis en organismos acuáticos (Martínez et al., 2022). Además, estudios han mostrado que la tartrazina puede tener efectos tóxicos en la fauna acuática, provocando cambios en el comportamiento, estrés oxidativo y, en algunos casos, mutagenicidad en ciertas especies de peces y organismos invertebrados (Gupta et al., 2020).

Desde el punto de vista de la salud humana, la exposición a la tartrazina a través del agua y alimentos contaminados se ha asociado con diversas reacciones adversas, incluyendo alergias, hiperactividad en niños y efectos sobre el sistema inmunológico. Si bien estos efectos varían según la dosis y la susceptibilidad individual, la persistencia de la tartrazina en el ambiente aumenta la probabilidad de exposición prolongada (Sharma & Kundu, 2019).

Para abordar estos desafíos, se propone el uso de procesos de oxidación avanzada (AOPs) para la degradación de la tartrazina. Los AOPs, como los basados en ozono y radiación UV combinada con peróxido de hidrógeno, son capaces de generar radicales hidroxilo altamente reactivos que atacan la estructura molecular del colorante, facilitando su degradación en compuestos menos tóxicos y biodegradables (Chen et al., 2023). Evaluar la eficiencia de estos métodos de oxidación homogéneos y heterogéneos en la eliminación de la tartrazina en agua permitirá establecer bases para su tratamiento efectivo y la minimización de sus efectos adversos.

1.4.1 Diagrama estructural de la Tartrazina

La tartrazina, conocida también como FD&C Yellow No. 5, es un colorante alimentario sintético de color amarillo, cuya fórmula molecular es $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$. Su estructura química incluye un sistema de anillos bencénicos unidos por un grupo azo (-N=N-), lo que clasifica a la tartrazina como un colorante azoico.

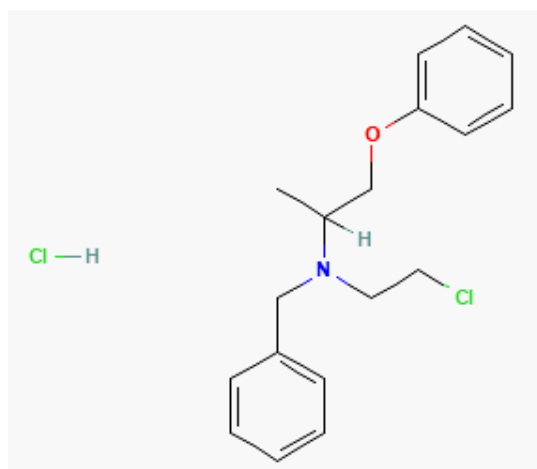


Figura 4 Tartazina. **Fuente:** National Center for Biotechnology Information. (2024). *Tartrazine* (CID=5284441). PubChem.

1.4.2 Efectos adversos de la Tartazina

La tartrazina, un colorante azoico ampliamente utilizado en alimentos, bebidas, cosméticos y medicamentos, es conocida por su potencial para causar efectos adversos tanto en la salud humana como en el medio ambiente. Este colorante, identificado como E102 en la industria alimentaria, ha sido objeto de numerosos estudios debido a los riesgos que plantea, especialmente en individuos sensibles o tras exposiciones prolongadas.

Uno de los efectos adversos más conocidos de la tartrazina es su potencial alergénico. Numerosas investigaciones indican que este colorante puede provocar reacciones alérgicas en personas susceptibles, incluyendo síntomas como urticaria, erupciones cutáneas, picazón y, en casos graves, angioedema (Lucas et al., 2021). La sensibilidad a la tartrazina parece ser más frecuente en personas con

antecedentes de asma y alergias, y también se ha relacionado con intolerancias alimentarias (El-Wahab & Moram, 2019).

Además, existen estudios que sugieren una relación entre el consumo de tartrazina y la aparición de hiperactividad en niños. Esta relación fue observada en un estudio publicado por (McCann et al. 2007), que asoció la ingesta de ciertos colorantes artificiales, incluida la tartrazina, con un incremento en los comportamientos hiperactivos en niños. Aunque este vínculo sigue siendo objeto de debate, algunas autoridades sanitarias han recomendado precaución en el consumo de tartrazina, especialmente en niños.

A nivel de sistemas, la tartrazina también ha mostrado tener efectos adversos en el sistema inmunológico. Investigaciones en animales sugieren que este colorante puede actuar como inmunotóxico, afectando la función de las células inmunitarias y contribuyendo a una respuesta inflamatoria desregulada (Feketea & Tsabouri, 2017). Asimismo, estudios recientes han señalado que la exposición prolongada a la tartrazina podría tener efectos genotóxicos, aumentando el riesgo de daño al ADN, lo cual tiene implicaciones en la salud a largo plazo y en el riesgo potencial de cáncer (Faria et al., 2022).

En el contexto de la exposición ambiental, la tartrazina también representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos. Su resistencia a la degradación natural en el agua la convierte en un contaminante persistente. Este colorante, al interferir con la transmisión de luz en el agua, puede afectar la fotosíntesis en organismos acuáticos, provocando un desequilibrio en dichos ecosistemas (Hussain et al., 2021).

1.5 Fuentes y vías de entrada al medio acuático de los fármacos y colorantes

Los microcontaminantes como el naproxeno, el paracetamol y el colorante tartrazina ingresan a cuerpos de agua principalmente a través de fuentes relacionadas con actividades humanas, incluyendo los sectores doméstico, industrial y agrícola. Una

vía de entrada relevante es el vertido de aguas residuales municipales, que a menudo contiene residuos de medicamentos y aditivos como el naproxeno y el paracetamol, frecuentemente recetados para el tratamiento de dolores y fiebre. Sin embargo, las plantas de tratamiento convencionales no son completamente eficaces para eliminar estos compuestos, lo que resulta en su descarga al ambiente acuático (Verlicchi et al., 2021).

La escorrentía agrícola representa otra vía significativa, ya que productos como la tartrazina, empleada en alimentos y productos de consumo, puede entrar al agua a través de suelos tratados con fertilizantes y pesticidas que arrastran residuos químicos (Kümmerer et al., 2018). Asimismo, los vertidos accidentales de productos industriales y las descargas de efluentes no regulados de instalaciones de manufactura contribuyen a la contaminación, aumentando la complejidad del tratamiento de estos microcontaminantes (Boxall et al., 2019).

Estos microcontaminantes persisten en el agua debido a su resistencia a la degradación y su capacidad de bioacumularse en la cadena alimentaria, lo que resalta la necesidad de tecnologías de tratamiento avanzadas. Métodos como los procesos de oxidación avanzada (AOPs) pueden ser necesarios para abordar de manera más efectiva la eliminación de estos compuestos y reducir sus efectos en la salud humana y el ecosistema acuático (Zhang et al., 2020).

1.6 Impacto ambiental de los microcontaminantes de los fármacos y colorantes

El impacto ambiental de los microcontaminantes, como el naproxeno, el paracetamol y el colorante tartrazina, en cuerpos de agua es un tema de creciente preocupación mundial debido a su persistencia y efectos ecotoxicológicos. Estos compuestos, comúnmente presentes en aguas residuales domésticas e industriales, ingresan al medio acuático en concentraciones bajas pero significativas, a menudo en niveles de partes por trillón, afectando negativamente a la vida acuática. El naproxeno y el paracetamol, como medicamentos de uso

frecuente, pueden tener efectos endocrinos en organismos acuáticos, mientras que la tartrazina, un colorante utilizado en productos de consumo, presenta potenciales efectos bioacumulativos y disruptores endocrinos en ciertas especies acuáticas (Schwarzenbach et al., 2019).

Los microcontaminantes impactan en los organismos a lo largo de diversos niveles tróficos, provocando efectos como problemas reproductivos y de desarrollo, especialmente en especies sensibles a disruptores endocrinos. El "efecto cóctel", derivado de la combinación de múltiples contaminantes como estos fármacos y aditivos, puede agravar el daño causado al ecosistema, al generar efectos sinérgicos que afectan la salud de poblaciones enteras de especies acuáticas y, eventualmente, a los organismos en niveles tróficos superiores (Gavrilescu et al., 2015).

A pesar de los avances en tratamientos de agua, como la filtración avanzada y los procesos de oxidación, la eliminación completa de estos microcontaminantes sigue siendo un desafío. Las plantas de tratamiento convencionales no están diseñadas para remover compuestos farmacéuticos ni colorantes, por lo que innovaciones en tecnologías de tratamiento son cruciales para mitigar su impacto ambiental y proteger la biodiversidad acuática (Noguera-Oviedo & Aga, 2016).

1.7 Impacto en la salud humana

El impacto de los microcontaminantes en la salud humana es una creciente preocupación, especialmente con compuestos como el naproxeno, el paracetamol y el colorante tartrazina, que pueden afectar negativamente la salud incluso a concentraciones muy bajas. Estos compuestos, presentes en aguas residuales urbanas y productos de consumo, tienen el potencial de interferir con procesos hormonales, actuando como disruptores endocrinos. La presencia de naproxeno y paracetamol en el agua es preocupante, ya que pueden acumularse en organismos acuáticos y en la cadena alimentaria, exponiendo a los seres humanos a efectos

potencialmente adversos, tales como trastornos reproductivos y aumento de riesgos de cáncer (Carvalho et al., 2019; Schneider et al., 2021).

El colorante tartrazina, utilizado en alimentos y productos de consumo, también plantea riesgos para la salud humana, ya que puede causar reacciones alérgicas y efectos neurotóxicos cuando se consume en cantidades elevadas, lo que subraya la importancia de la regulación de estos compuestos en el agua. Además, al ser persistentes y bioacumulables, estos microcontaminantes pueden transferirse a través de la cadena alimentaria, exponiendo a los seres humanos no solo mediante la ingesta de agua contaminada, sino también a través del consumo de productos acuáticos contaminados, como peces (Choi et al., 2020). Aunque los efectos a largo plazo de estos microcontaminantes aún están siendo estudiados, investigaciones previas sugieren que la exposición continua a niveles bajos de estos compuestos puede causar efectos neurotóxicos, inmunológicos y reproductivos, especialmente en poblaciones vulnerables (Loos et al., 2020).

1.8 Concentraciones típicas de microcontaminantes en cuerpos de agua de los fármacos y colorantes

Los microcontaminantes, como el naproxeno, el paracetamol y el colorante tartrazina, suelen encontrarse en cuerpos de agua en concentraciones extremadamente bajas, generalmente medidas en partes por billón (ppb) o partes por trillón (ppt). Aunque estas concentraciones son minúsculas, con valores tan bajos como una gota de contaminante disuelta en una piscina olímpica, los efectos acumulativos de estos compuestos pueden tener impactos ecológicos adversos significativos en organismos acuáticos y en la biodiversidad, debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente. En el caso de compuestos farmacéuticos como el naproxeno y el paracetamol, estos se han detectado en aguas residuales y cuerpos de agua cercanos a zonas urbanas, representando una amenaza debido a su efecto disruptor endocrino y potencial bioacumulativo (Wang et al., 2021; Ochoa et al., 2022). El colorante tartrazina, aunque generalmente considerado seguro en

productos alimenticios, ha sido encontrado en bajas concentraciones en cuerpos de agua y se sabe que puede tener efectos adversos sobre la salud acuática. La presencia de estos microcontaminantes varía dependiendo de la localización y las actividades humanas circundantes, pero en muchos estudios se ha reportado que estos compuestos superan los umbrales de seguridad para la vida acuática, lo que genera preocupación por su persistencia y efectos a largo plazo (Toscan et al., 2020). Por ejemplo, investigaciones recientes han encontrado niveles de naproxeno y paracetamol que podrían tener efectos tóxicos en organismos acuáticos, incluso a concentraciones de apenas 1-10 ppb en algunas regiones (Miller et al., 2020).

1.9 Importancia del tratamiento de microcontaminantes en agua de los fármacos y colorantes

La acumulación de microcontaminantes como el naproxeno, el paracetamol y el colorante tartrazina en cuerpos de agua plantea un grave problema ambiental y de salud pública. Estos compuestos, que pertenecen a la categoría de contaminantes emergentes, son difíciles de eliminar mediante tratamientos convencionales de agua debido a sus propiedades químicas, estabilidad y resistencia a la biodegradación (Nazifa et al., 2021). La persistencia de estos microcontaminantes en el ambiente provoca que se mantengan activos en el agua a concentraciones traza, que aunque bajas, pueden tener efectos perjudiciales a largo plazo tanto en el ecosistema como en la salud humana.

Uno de los principales riesgos es su potencial para interrumpir el sistema endocrino de organismos acuáticos y humanos, un fenómeno que se observa particularmente en contaminantes como el paracetamol, el cual, a pesar de ser común en el consumo diario, es resistente a los tratamientos convencionales de agua (Puto et al., 2024). Estos efectos disruptores endocrinos alteran los sistemas hormonales, afectando procesos como el crecimiento, el desarrollo y la reproducción de las especies acuáticas, además de representar un riesgo de bioacumulación, lo que significa que estos compuestos pueden pasar a través de la cadena alimentaria, acumulándose en los tejidos de los organismos.

Además, compuestos como la tartrazina, un colorante ampliamente usado en la industria alimentaria, muestran una alta resistencia a la biodegradación, acumulándose en aguas residuales y afectando la calidad de los ecosistemas acuáticos. Esto enfatiza la necesidad de aplicar tratamientos avanzados, como los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs), que han mostrado eficacia en la degradación de estos compuestos complejos, reduciendo su toxicidad y mejorando la calidad del agua (Muhamad et al., 2021).

1.10 Métodos de Oxidación Avanzada

Los Métodos de Oxidación Avanzada (AOPs, por sus siglas en inglés) son un conjunto de procesos que se destacan en el tratamiento de aguas debido a su capacidad de degradar eficientemente una variedad de contaminantes orgánicos, especialmente aquellos denominados como microcontaminantes. Estos microcontaminantes incluyen fármacos, productos de cuidado personal, pesticidas y colorantes industriales, los cuales suelen persistir en el ambiente y presentar dificultades para ser eliminados por métodos convencionales de tratamiento de agua (Esplugas et al., 2007). La relevancia de los AOPs en la eliminación de estos compuestos radica en su capacidad de generar radicales altamente reactivos, como el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), el cual posee un elevado potencial de oxidación y es capaz de descomponer enlaces orgánicos complejos que forman parte de la estructura de los microcontaminantes (Glaze et al., 1987).

1.11 Procesos homogéneos y heterogéneos en los AOPS

Dentro de los AOPs, se pueden diferenciar los procesos en función de su fase de reacción. Los procesos homogéneos, como el Fenton y el foto-Fenton, ocurren en una sola fase, típicamente en fase líquida, donde los reactivos y catalizadores están completamente disueltos en el agua. Estos procesos son ampliamente estudiados debido a su simplicidad y eficiencia en la generación de radicales hidroxilo (Neyens & Baeyens, 2003). Sin embargo, presentan limitaciones como la necesidad de pH ácidos y el uso de reactivos que pueden generar subproductos indeseables.

Por otro lado, los procesos heterogéneos implican múltiples fases, como la fotocátalisis heterogénea, donde un catalizador sólido, comúnmente el dióxido de titanio (TiO_2), interactúa con la fase líquida. Bajo irradiación de luz UV, el TiO_2 genera especies reactivas que pueden oxidar los contaminantes presentes en el agua (Herrmann, 1999). Estos métodos heterogéneos presentan ventajas como la posibilidad de recuperación y reutilización del catalizador, aunque su eficiencia depende de factores como la intensidad de la luz y la superficie específica del catalizador.

En cuanto a los procesos heterogéneos, la fotocátalisis con TiO_2 ha sido ampliamente investigada para la eliminación de contaminantes recalcitrantes. El TiO_2 es excitado por la luz UV, lo que genera electrones y huecos en su superficie que pueden reaccionar con moléculas de agua y oxígeno, produciendo radicales hidroxilo y especies oxidantes (Fujishima & Zhang, 2006). Este proceso ha demostrado ser efectivo en la degradación de colorantes como la tartrazina, aunque su eficiencia puede verse afectada por factores como la turbidez del agua y la concentración de contaminantes.

1.12 Fundamentos de los métodos de oxidación homogénea y heterogénea

Los métodos de oxidación avanzada (AOPs) son herramientas potentes para la eliminación de microcontaminantes en el agua. En el caso de los métodos homogéneos de oxidación, la reacción química ocurre en una única fase, generalmente líquida, donde los agentes oxidantes, como el ozono (O_3) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), se disuelven y reaccionan con los contaminantes en el medio acuoso. Estos métodos aprovechan la formación de especies altamente reactivas, como los radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), los cuales tienen un potencial de oxidación extremadamente alto, permitiéndoles atacar y degradar compuestos orgánicos complejos que de otra manera serían difíciles de eliminar (Esplugas et al., 2002; Gogate & Pandit, 2004). Un ejemplo notable es la combinación de ozono

con peróxido de hidrógeno, que incrementa la generación de radicales libres y facilita la degradación de contaminantes persistentes.

Por otro lado, los métodos heterogéneos de oxidación implican la presencia de un catalizador sólido que interactúa con los contaminantes, mientras que la fase líquida contiene los microcontaminantes. Uno de los métodos heterogéneos más estudiados es la fotocatalisis con dióxido de titanio (TiO_2), donde el TiO_2 , al ser irradiado con luz UV, genera especies reactivas en su superficie, tales como radicales hidroxilo y oxígeno reactivo, capaces de oxidar los contaminantes orgánicos en el agua (Herrmann, 1999; Fujishima et al., 2008). Esta interacción catalítica permite que el TiO_2 sea reutilizado, lo cual representa una ventaja significativa en términos de sostenibilidad y eficiencia.

En ambos casos, los AOPs son métodos eficientes para tratar microcontaminantes específicos como el naproxeno, el paracetamol y el colorante tartrazina. Sin embargo, cada tipo de método tiene ventajas y limitaciones según las condiciones de operación y la naturaleza de los contaminantes. Mientras los métodos homogéneos suelen requerir un control riguroso de las dosis de oxidantes y pueden generar subproductos, los métodos heterogéneos, como la fotocatalisis, presentan el desafío de requerir irradiación específica y pueden enfrentar limitaciones en la transferencia de masa (Andreozzi et al., 1999; Zhang et al., 2013).

1.13 Comparación de métodos de tratamiento convencionales y métodos de oxidación avanzada

Los métodos convencionales de tratamiento de aguas, como la filtración, la decantación, la desinfección con cloro y la oxidación básica, han demostrado ser efectivos en la eliminación de una amplia gama de contaminantes, principalmente patógenos, sólidos suspendidos y contaminantes inorgánicos. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones significativas cuando se trata de eliminar microcontaminantes orgánicos, tales como productos farmacéuticos, productos de cuidado personal y algunos tipos de pesticidas, entre otros (Bolong et al., 2009;

Michael et al., 2013). Estas sustancias, debido a sus características químicas, pueden resistir los procesos de tratamiento tradicionales y, por tanto, persistir en el efluente tratado, lo que representa un riesgo para los ecosistemas y la salud humana (Snyder et al., 2003).

Entre las limitaciones de los métodos convencionales, la filtración se basa en la separación física de partículas, pero los microcontaminantes orgánicos suelen ser moléculas pequeñas y disueltas, lo que hace que pasen a través de los filtros convencionales sin ser eliminados eficazmente. En el caso de la desinfección con cloro, aunque es efectiva para inactivar microorganismos, puede resultar ineficaz para degradar microcontaminantes. Además, el cloro puede reaccionar con los compuestos orgánicos presentes y formar subproductos de desinfección (DBPs), que son sustancias potencialmente tóxicas y resistentes a la biodegradación (Deborde & von Gunten, 2008).

Por otro lado, el uso de coagulación-floculación y otros tratamientos físico-químicos tradicionales tiene una capacidad limitada para remover microcontaminantes, especialmente aquellos que son hidrofílicos o de baja reactividad. Estos procesos están diseñados para agrupar partículas suspendidas en el agua, pero no son efectivos para disolver o degradar compuestos orgánicos persistentes (Klavarioti et al., 2009).

Estos desafíos han impulsado la investigación y el desarrollo de los métodos de oxidación avanzada (AOPs), que ofrecen una alternativa eficaz para la eliminación de microcontaminantes en el agua. Los AOPs, a través de la generación de especies reactivas de oxígeno, como los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), pueden descomponer compuestos orgánicos resistentes, logrando su mineralización o transformándolos en sustancias menos tóxicas y más biodegradables (Wells et al., 2012; Zhang et al., 2017). Esto justifica el enfoque de investigación en métodos homogéneos y heterogéneos de oxidación, ya que estos permiten la eliminación

efectiva de microcontaminantes específicos, tales como naproxeno, paracetamol y tartrazina, que son difíciles de tratar mediante métodos convencionales.

1.14 Desafíos y avances recientes en la eliminación de microcontaminante

La eliminación de microcontaminantes en cuerpos de agua mediante Métodos de Oxidación Avanzada (AOPs) enfrenta varios desafíos importantes, entre los cuales destacan la generación de subproductos tóxicos y los costos elevados asociados a estos tratamientos. Según Zhang et al. (2021), los AOPs pueden conducir a la formación de subproductos no deseados que en algunos casos pueden ser incluso más tóxicos que los compuestos originales. Este problema es común cuando el proceso de oxidación no es completamente eficiente, lo cual puede resultar en la transformación parcial de los microcontaminantes en compuestos intermedios potencialmente dañinos para el medio ambiente y la salud humana (Xu et al., 2020). Además, los tratamientos avanzados de oxidación suelen requerir altos consumos energéticos y materiales reactivos, lo cual incrementa los costos operativos, limitando su aplicabilidad a gran escala (Miklos et al., 2018).

Además, la variabilidad en las concentraciones y tipos de microcontaminantes presentes en el agua constituye otro desafío. Los microcontaminantes no solo incluyen medicamentos como el naproxeno y el paracetamol, sino también otros productos industriales y compuestos emergentes como pesticidas y productos de cuidado personal. La diversidad y complejidad química de estos compuestos hace que su tratamiento efectivo requiera procesos adaptables y selectivos, lo cual añade una capa de dificultad a la implementación de tratamientos AOPs (Rodríguez-Narvaez et al., 2017).

En respuesta a estos desafíos, la investigación en AOPs ha avanzado considerablemente en los últimos años, buscando principalmente optimizar la eficiencia de los procesos y reducir la generación de subproductos tóxicos. Una línea de investigación destacada incluye la aplicación de catalizadores específicos que pueden mejorar la selectividad del proceso de oxidación, minimizando así la

producción de subproductos indeseables (Xiao et al., 2019). Estos catalizadores, como los basados en metales de transición, han demostrado ser efectivos en la degradación de microcontaminantes en procesos heterogéneos, permitiendo una reacción más controlada y eficiente (Bautista et al., 2017).

Otro avance reciente es la incorporación de tecnologías híbridas, que combinan AOPs con otros métodos de tratamiento, como la adsorción o la filtración por membranas. Estas tecnologías híbridas permiten no solo una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes, sino también una menor generación de subproductos tóxicos (Silva et al., 2019). Por ejemplo, combinar la fotocatalisis con membranas de filtración puede incrementar la eficiencia del proceso y reducir los costos energéticos al permitir un flujo continuo en el tratamiento de agua (Giri et al., 2022).

Por último, se ha promovido la investigación en materiales catalíticos sostenibles y fuentes de energía renovables, como la energía solar, para activar los procesos de oxidación (Choi & Lee, 2020). Esta estrategia no solo reduce los costos de operación, sino que también responde a la creciente demanda de prácticas sostenibles en el tratamiento de aguas. Estos avances representan un cambio hacia una mayor sostenibilidad en la eliminación de microcontaminantes, con el potencial de hacer que los AOPs sean más accesibles y efectivos para aplicaciones a gran escala en el futuro cercano.

Capítulo 2.

Desarrollo

experimental

2. Desarrollo experimental

En este capítulo se presentan los métodos y técnicas empleadas en el estudio de la degradación de microcontaminantes presentes en agua, específicamente mediante la aplicación de diversos Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs, por sus siglas en inglés). Dada la complejidad y diversidad de los compuestos analizados, se ha estructurado el capítulo en dos apartados principales. En el primero, se detalla la metodología utilizada para la degradación de fármacos como el naproxeno y el paracetamol, destacando su persistencia en cuerpos de agua y los riesgos asociados a su acumulación. En el segundo apartado, se describe el tratamiento aplicado a contaminantes de tipo colorante, como la tartrazina, enfatizando la relevancia de estos tratamientos ante los desafíos que plantean para la calidad del agua y el medio ambiente.

2.1 Métodos y técnicas para la degradación de fármacos

Los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) representan una serie de tecnologías basadas en procesos fisicoquímicos que han demostrado ser efectivos en la eliminación de microcontaminantes, especialmente aquellos que los métodos convencionales no logran remover de manera eficaz. Estos procesos de tratamiento de agua se caracterizan por la generación in situ de especies altamente reactivas, como los radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el superóxido (O_2^-), que poseen un elevado poder oxidante capaz de degradar compuestos orgánicos complejos.

Los AOPs se utilizan comúnmente en condiciones cercanas a temperatura y presión ambiente, lo cual los hace viables y eficientes desde una perspectiva operativa y económica. Existen múltiples variantes dentro de los AOPs, clasificadas en procesos homogéneos y heterogéneos, dependiendo de si las fases de reacción se desarrollan en una sola fase (como en el proceso Fenton) o en más de una fase, como en la fotocatálisis heterogénea (fase sólido-líquido).

En el caso de los fármacos, se han estudiado diversas metodologías específicas de AOPs para su degradación debido a su complejidad química y su capacidad de persistir en el medio acuático, lo cual representa un desafío significativo. Los radicales generados durante los AOPs interactúan con las moléculas de los fármacos, descomponiéndolas en compuestos más simples y, en última instancia, permitiendo su mineralización.

Los AOPs homogéneos incluyen métodos como el proceso Fenton y el Fenton mejorado, en los cuales el peróxido de hidrógeno se activa en presencia de iones de hierro para producir radicales hidroxilo que degradan los compuestos orgánicos. En estos métodos, la adición de luz UV o radiación solar puede incrementar la eficiencia del proceso. Por otro lado, los AOPs heterogéneos, como la fotocatálisis, utilizan catalizadores sólidos (frecuentemente dióxido de titanio, TiO_2) bajo irradiación UV para generar radicales capaces de oxidar compuestos orgánicos complejos. Esta técnica ha mostrado ser particularmente efectiva para la degradación de fármacos persistentes como el naproxeno y el paracetamol.

La relevancia de estos métodos radica en su capacidad para tratar contaminantes que afectan tanto la calidad del agua como la salud pública, debido a que estos compuestos, al acumularse, presentan riesgos como la interrupción endocrina y la bioacumulación en la cadena alimentaria. La correcta elección y aplicación de los AOPs permite enfrentar de manera efectiva estos desafíos, ofreciendo soluciones para la degradación de compuestos resistentes y contribuyendo a la protección de los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

2.2 Especificaciones de los materiales y reactivos utilizados durante el desarrollo experimental de los fármacos

En esta sección se detallan los reactivos y materiales empleados en el desarrollo experimental del tratamiento de microcontaminantes en agua mediante Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs). La selección de estos reactivos y materiales es clave para la generación de radicales oxidantes eficientes en el proceso de

degradación de los contaminantes, como los fármacos y colorantes estudiados. A continuación, se describen las características de cada reactivo y material, proporcionando una visión integral de su rol en los experimentos.

Reactivos

1. Naproxeno

Fórmula química: $C_{14}H_{14}O_3$

Peso molecular: 230.26 g/mol

Punto de fusión: 153 °C (307 °F)

Solubilidad en agua: 15.9 mg/L (a 25 °C)

Color: Blanco

Olor: Inodoro

Su inclusión en el estudio permite analizar la eficacia de los AOPs en la degradación de compuestos farmacéuticos persistentes.

2. Paracetamol

Fórmula química: $C_8H_9NO_2$

Peso molecular: 151.163 g/mol

Punto de fusión: 169 °C (336 °F)

Solubilidad en agua: 12.78 mg/L (a 20 °C)

Color: Blanco

Olor: Inodoro

Su degradación es crucial para mitigar sus efectos en el ambiente, donde puede afectar la fauna acuática y bioacumularse en la cadena trófica.

3. **Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)**

Fórmula química: H_2O_2

Peso molecular: 34.0147 g/mol

Punto de fusión: -0.43 °C

Solubilidad en agua: Totalmente soluble

Color: Incoloro

El H_2O_2 actúa como un agente oxidante principal en la degradación de compuestos orgánicos complejos, descomponiéndolos en sustancias menos tóxicas.

4. **Ozono (O_3)**

Fórmula química: O_3

Peso molecular: 48 g/mol

Punto de fusión: -192.2 °C

Solubilidad en agua: 0.105 g/100 mL (a 0 °C)

Color: Azul

Es un oxidante fuerte empleado en AOPs, generando radicales hidroxilo al disolverse en agua. Su uso es relevante para la degradación de microcontaminantes debido a su alta reactividad con compuestos orgánicos, proporcionando una vía alternativa a la fotocatálisis para degradar fármacos y colorantes resistentes.

Materiales y Equipos

1. Lámpara Ultravioleta (UV)

Potencia: 11 W

La lámpara UV es utilizada en procesos de fotocatálisis y en la activación del peróxido de hidrógeno para producir radicales oxidantes. La exposición a la radiación UV incrementa la eficiencia de degradación de los microcontaminantes al activar los reactivos.

2. Generador de Ozono (Modelo GL-3189a)

Potencia: 12 W

El generador de ozono permite la producción de ozono in situ, el cual es introducido en las muestras de agua para facilitar el tratamiento oxidativo. La generación de ozono controlada es esencial para mantener condiciones adecuadas y seguras durante los experimentos.

3. Bomba Sumergible

Potencia: 12 W

Este equipo permite una mezcla homogénea en las muestras, asegurando que los reactivos se distribuyan uniformemente en el sistema, lo que es fundamental para la eficiencia en los procesos de oxidación avanzada.

4. Espectrofotómetro UV-Visible (Modelo VE-5100 UV)

Este instrumento permite la medición de la concentración de microcontaminantes en función de la absorbancia de las muestras tratadas. La espectrofotometría UV-visible es fundamental para evaluar la eficiencia del proceso de degradación y analizar los cambios en la composición química de los contaminantes.

5. Medidor Multiparámetro (Modelo Gro Line HI 9814)

Utilizado para medir parámetros como el pH, la conductividad y el contenido de sólidos disueltos, el medidor multiparámetro es esencial para el control de las condiciones experimentales, las cuales pueden afectar la eficiencia de los AOPs.

Estos reactivos y materiales proporcionan las condiciones óptimas para llevar a cabo los experimentos de degradación de microcontaminantes, asegurando la efectividad de los procesos de oxidación avanzada y permitiendo una evaluación precisa de la eficiencia de los métodos de tratamiento utilizados.

2.2.1 Dispositivo experimental de los fármacos

La **Figura 5** ilustra el montaje experimental diseñado específicamente para la degradación de los microcontaminantes naproxeno y paracetamol mediante procesos de oxidación avanzada (AOPs). Este sistema ha sido configurado cuidadosamente para optimizar la generación y aplicación de radicales oxidantes en el tratamiento de microcontaminantes, incorporando tanto elementos de activación UV como ozono, que son fundamentales para la degradación efectiva de compuestos resistentes en agua.

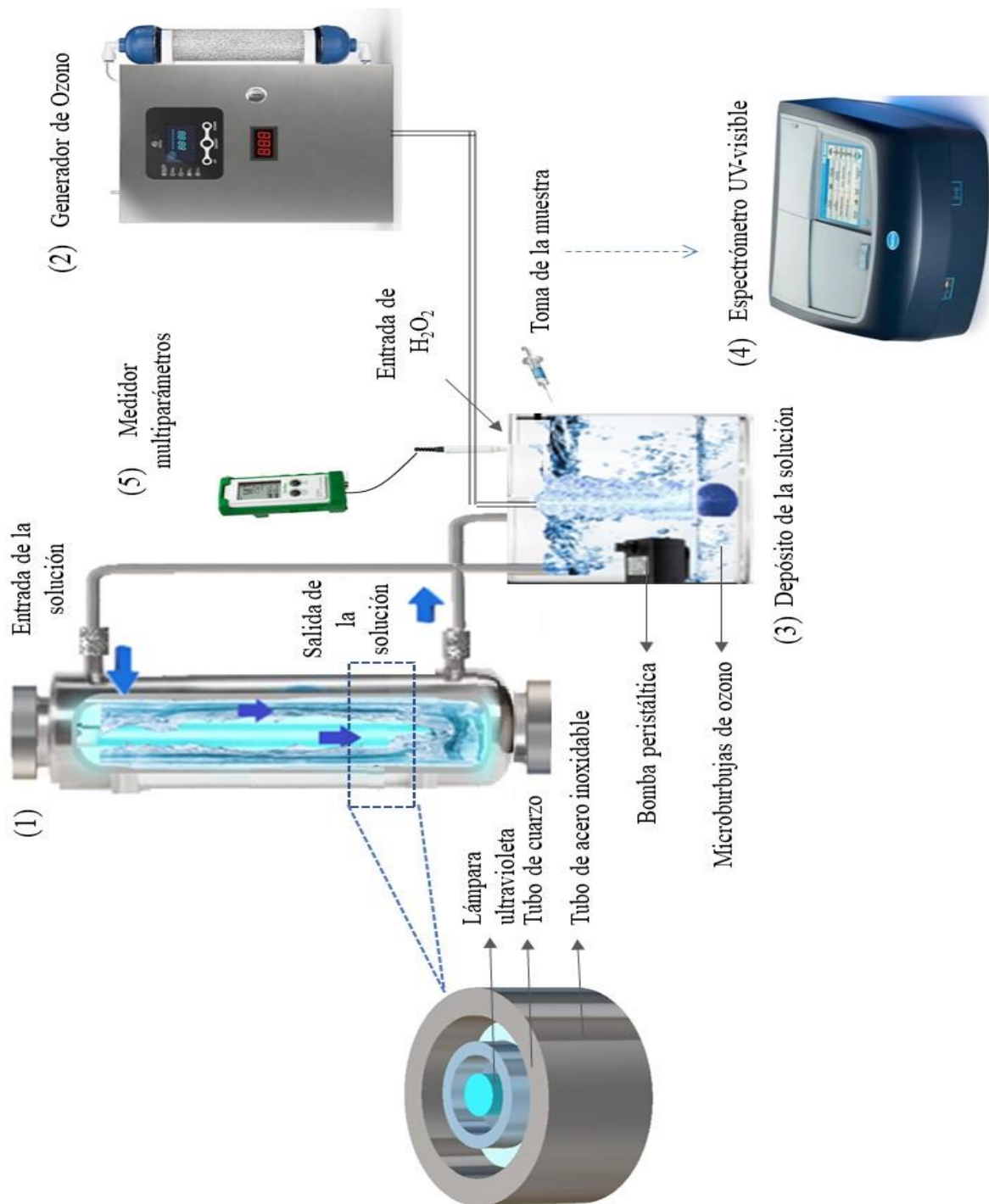


Figura 5 Dispositivo experimental de los fármacos. **Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se describen en detalle los componentes del sistema experimental:

1. Reactor de Tratamiento

El reactor principal es de configuración cilíndrica, fabricado en acero inoxidable para garantizar la durabilidad y resistencia a la corrosión durante el proceso. Con una longitud de 40 cm y un diámetro de 8 cm, el diseño cilíndrico facilita el flujo y la distribución homogénea de los reactivos en la solución tratada. En el centro del reactor se encuentra instalada una lámpara de ultravioleta (UV) de 11 W, protegida por un tubo de cuarzo que resiste condiciones de alta intensidad UV. Esta lámpara emite en el rango de longitud de onda de 200-280 nm, generando la energía necesaria para activar el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) presente en la muestra y producir radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$). Estos radicales, altamente reactivos, son los responsables de degradar los contaminantes orgánicos complejos presentes en el agua.

2. Generador de Ozono (Modelo GL-3189a)

Este dispositivo tiene una potencia de 12 W y utiliza aire atmosférico como fuente de oxígeno para la generación de ozono (O_3). El ozono producido se inyecta en la solución, donde reacciona con los compuestos presentes para formar radicales adicionales que intensifican el proceso oxidativo. La capacidad de generar ozono in situ permite mantener un suministro constante y controlado de este poderoso oxidante, esencial para descomponer las moléculas de microcontaminantes de manera eficaz.

3. Depósito de Solución y Sistema de Recirculación

El depósito es un contenedor donde se almacena la muestra sintética que contiene naproxeno y paracetamol. Para asegurar un flujo constante y homogéneo en el reactor, el sistema cuenta con una bomba sumergible de 12 W, capaz de elevar la solución a una altura máxima de 6 metros. Este sistema de recirculación permite que la solución pase repetidamente a través del reactor, aumentando el tiempo de

exposición a los agentes oxidantes (ozono y radiación UV) y mejorando así la eficiencia de degradación de los microcontaminantes.

4. Espectrofotómetro UV-Visible (Modelo VE 5100UV)

Este instrumento de operación manual permite la evaluación de la concentración de los contaminantes antes y después del tratamiento mediante la medición de la absorbancia en el rango UV-visible. La capacidad de realizar lecturas precisas y rápidas de absorbancia es crucial para monitorear la eficacia del proceso de oxidación, ya que permite determinar los cambios en la concentración de naproxeno y paracetamol, evaluando así el grado de degradación alcanzado.

5. Medidor Multiparámetro (Modelo Gro Line HI 9814)

El medidor multiparámetro permite la medición de parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad y los sólidos disueltos, los cuales son importantes para mantener y controlar las condiciones óptimas. Estos parámetros pueden influir en la eficacia de los AOPs, ya que la generación y estabilidad de radicales oxidantes pueden verse afectadas por el pH y la conductividad del medio.

2.2.2 Procedimiento

El procedimiento experimental fue diseñado para evaluar la eficacia de los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) en la degradación de los microcontaminantes naproxeno y paracetamol. Las muestras sintéticas fueron procesadas en un sistema de tratamiento que combina la irradiación UV y la inyección de ozono, empleando una metodología estandarizada que permite un análisis comparativo de las condiciones experimentales.

La **Figura 6** muestra el diagrama de flujo del procedimiento experimental, en el que se detallan las etapas clave de operación del sistema, desde la recirculación de la muestra hasta el monitoreo por espectrofotometría UV-Visible.

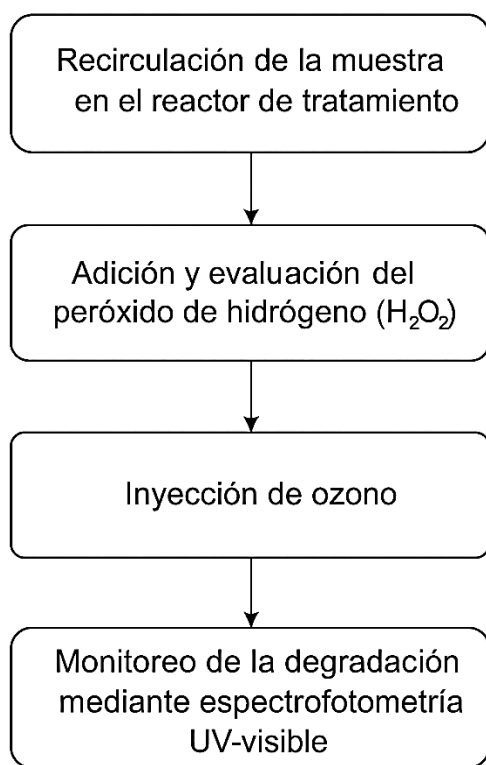


Figura 6 Diagrama de flujo del procedimiento. **Fuente:** Elaboración propia.

1. Recirculación de la Muestra en el Reactor de Tratamiento

Las muestras sintéticas fueron ingresadas en la parte superior del reactor de tratamiento y recolectadas en el depósito de solución. Para mantener un flujo constante y homogéneo, se utilizó una bomba sumergible que permite la recirculación continua de la solución entre el reactor y el depósito. Este sistema de recirculación asegura que la muestra pase repetidamente a través de las áreas de irradiación UV y contacto con ozono, optimizando así la exposición a los agentes oxidantes y mejorando la eficiencia del proceso de degradación.

2. Adición y Evaluación del Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂)

Cuando se utilizó H₂O₂ como agente oxidante complementario, fue añadido directamente al depósito de solución antes de iniciar el tratamiento. Para evaluar el

efecto de la concentración inicial de H_2O_2 en la eficiencia de degradación, se prepararon tres concentraciones: 1 mL, 2 mL y 3 mL. Esta variación en la cantidad de H_2O_2 permite analizar su impacto en la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) y optimizar la dosis de peróxido de hidrógeno para lograr una degradación más efectiva de los microcontaminantes.

3. Inyección de Ozono

El ozono (O_3) fue inyectado en el depósito mediante una piedra difusora circular, la cual genera burbujas finas para maximizar el contacto del ozono con la solución. Este diseño permite una transferencia efectiva de ozono al medio líquido, incrementando la producción de especies oxidantes que reaccionan con los contaminantes presentes en el agua. La difusión controlada del ozono es crucial para mantener condiciones óptimas de oxidación sin provocar una sobredosificación que podría influir en la estabilidad de los radicales hidroxilo generados.

4. Monitoreo de la Degradación Mediante Espectrofotometría UV-Visible

La caracterización de cada muestra fue realizada utilizando un espectrofotómetro UV-visible, tomando mediciones de absorbancia antes del inicio del tratamiento y luego cada 10 minutos, durante un periodo total de 60 minutos. Este monitoreo constante permite evaluar la cinética de degradación de los contaminantes y determinar la tasa de disminución en la concentración de naproxeno y paracetamol. Las longitudes de onda de máxima absorbancia para el naproxeno y el paracetamol se determinaron previamente, encontrándose en 331 nm y 296 nm, respectivamente. Estas longitudes de onda se utilizaron como referencia para cuantificar la degradación de los microcontaminantes a lo largo del tratamiento.

2.2.3 Preparación de la muestra sintética

La preparación de las muestras sintéticas fue un paso fundamental para asegurar la reproducibilidad y precisión de los experimentos. Cada muestra fue preparada con una concentración inicial de 100 ppm del microcontaminante (naproxeno o

paracetamol) en un volumen de 800 mL de agua destilada. Esta concentración fue seleccionada para simular niveles realistas de contaminación en cuerpos de agua y para facilitar la medición y análisis de la degradación a través de espectrofotometría UV-visible.

En la **Figura 7** se presenta el diagrama de flujo del procedimiento de preparación de la muestra sintética, el cual resume de forma esquemática los pasos principales seguidos durante esta etapa.

Se emplearon compuestos en grado analítico, tanto de naproxeno como de paracetamol, lo cual asegura la pureza del reactivo y mejora su disolución en el medio acuoso. La pureza del grado analítico permite obtener resultados más precisos y minimiza la interferencia de impurezas en la respuesta espectral de las muestras, asegurando que las mediciones reflejen únicamente la degradación del compuesto objetivo.

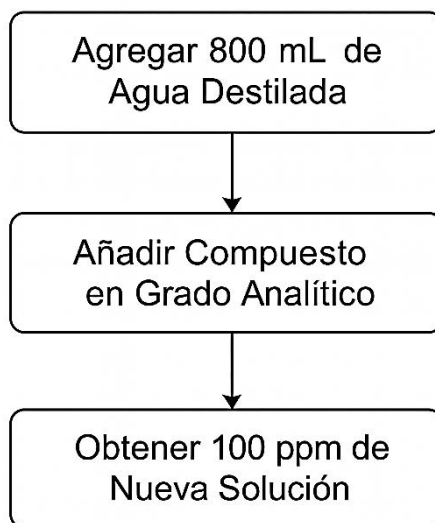


Figura 7 Diagrama de flujo preparación de muestra sintetica. **Fuente:** Elaboración propia.

2.2.4 Consideraciones adicionales

Este procedimiento experimental asegura un control riguroso de las condiciones de tratamiento y permite evaluar de manera sistemática la eficiencia de los AOPs en la eliminación de contaminantes específicos. La cuidadosa preparación y caracterización de las muestras, junto con el monitoreo constante de los parámetros fisicoquímicos y la concentración de los microcontaminantes, proporciona datos confiables sobre la efectividad del tratamiento. Estos resultados son cruciales para entender el comportamiento de los microcontaminantes en sistemas de tratamiento y para desarrollar estrategias aplicables a nivel industrial en la purificación de aguas residuales.

2.2.5 Selección del método de tratamiento

Fueron utilizados diversos Procesos de Oxidación Avanzada para el tratamiento del Naproxeno (**Tabla 1**) y Paracetamol (**Tabla 2**).

Para el tratamiento del microcontaminante naproxeno, se llevaron a cabo cinco diferentes ensayos experimentales utilizando Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs), en los cuales se aplicaron combinaciones de irradiación UV, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ozono (O_3). Cada tratamiento fue aplicado a una solución sintética de 100 ppm de naproxeno, manteniendo constantes las condiciones de volumen y concentración inicial. Las muestras fueron sometidas a análisis de degradación durante un periodo total de 60 minutos, con evaluaciones cada 10 minutos.

La **Tabla 1** resume los métodos de tratamiento aplicados y los tiempos de muestreo correspondientes, permitiendo una visión clara de la secuencia experimental desarrollada. En total, se realizaron 30 mediciones experimentales distribuidas entre los cinco tratamientos y seis tiempos de muestreo, lo que permitió establecer comparaciones precisas entre las eficiencias de los tratamientos evaluados.

Tabla 1. Desarrollo experimental Naproxeno

Método de tratamiento	Tiempo de Tratamiento					
	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos	60 Minutos
UV/100 ppm Naproxeno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
H ₂ O ₂ 100 ppm Naproxeno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
O ₃ 100 ppm Naproxeno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/H ₂ O ₂ 100 ppm Naproxeno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/H ₂ O ₂ /O ₃ 100 ppm Naproxeno	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar al naproxeno, el diseño experimental para evaluar la degradación del paracetamol incluyó cuatro tratamientos distintos con AOPs. Se utilizó una concentración inicial de 100 ppm de paracetamol, con un volumen total de 800 mL por tratamiento. En cada uno de los métodos se midió la eficiencia de degradación en intervalos de 10 minutos hasta completar una hora, obteniendo así un total de 24 mediciones experimentales. Este enfoque sistemático permitió observar la evolución del proceso de oxidación bajo diferentes combinaciones de agentes oxidantes.

La **Tabla 2** presenta un resumen de los métodos aplicados al paracetamol, junto con los tiempos de tratamiento correspondientes. Esta organización experimental facilitó la comparación entre las distintas configuraciones evaluadas, contribuyendo al análisis de la eficiencia de cada tratamiento.

Tabla 2. Desarrollo experimental Paracetamol

Método de tratamiento	Tiempo de Tratamiento					
	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos	60 minutos
UV/100 ppm Paracetamol	✓	✓	✓	✓	✓	✓
H ₂ O ₂ 100 ppm Paracetamol	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/H ₂ O ₂ 100 ppm Paracetamol	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/H ₂ O ₂ /O ₃ 100 ppm Paracetamol	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia.

2.2.6 Caracterización de la muestra

La caracterización de las muestras fue fundamental para evaluar la eficiencia de los métodos de oxidación avanzada (AOPs) empleados en la degradación de microcontaminantes específicos, como el naproxeno y el paracetamol. Este análisis se realizó de forma cuantitativa mediante un espectrómetro UV-visible, permitiendo monitorear los cambios en la concentración de los contaminantes a lo largo del proceso de tratamiento.

Inicialmente, se determinaron las longitudes de onda de máxima absorbancia para cada contaminante, estableciéndose 331 nm para el naproxeno y 296 nm para el paracetamol. Estas longitudes de onda fueron utilizadas como puntos de referencia para medir la absorbancia de las muestras en diferentes momentos del tratamiento, proporcionando datos precisos sobre la tasa de degradación de cada compuesto. La disminución en la absorbancia de las soluciones tratadas se asocia directamente con la reducción en la concentración del contaminante, permitiendo evaluar la eficacia de los AOPs aplicados en términos de eliminación de los microcontaminantes en agua.

Esta caracterización permite analizar de manera detallada cómo los AOPs impactan en la estructura química de los contaminantes y ayudan a identificar el porcentaje de degradación alcanzado en función del tiempo, facilitando la comparación entre los diferentes métodos de oxidación empleados y optimizando los parámetros para maximizar la eficiencia del tratamiento.

2.3 Métodos y técnicas para la degradación de colorantes

La eliminación de colorantes en el agua es un desafío significativo debido a su complejidad química, alta solubilidad y estabilidad. Los colorantes, como la tartrazina, persisten en cuerpos de agua y presentan riesgos ambientales, afectando la calidad del agua y la salud de los organismos acuáticos debido a su capacidad de bioacumulación y toxicidad. Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales incluyen tratamientos biológicos, físicos y químicos, los cuales han demostrado ser insuficientes para una eliminación completa de colorantes y otros microcontaminantes.

Tratamientos Biológicos

Los tratamientos biológicos son métodos ampliamente utilizados para la degradación de la materia orgánica mediante microorganismos. Estos tratamientos, como los sistemas de lodos activados, son efectivos para eliminar sustancias

biodegradables en aguas residuales. Sin embargo, los colorantes suelen ser resistentes a la degradación biológica debido a su estructura molecular compleja y baja biodegradabilidad. Aunque los tratamientos biológicos son económicamente viables y ecológicos, su efectividad en la eliminación de colorantes es limitada y no garantiza un nivel de purificación que cumpla con las normativas de descarga de aguas residuales.

Tratamientos Físicos

Los tratamientos físicos, tales como la filtración, adsorción y sedimentación, no involucran reacciones químicas, sino que dependen de la separación mecánica de los contaminantes. En el caso de los colorantes, la adsorción en carbón activado es uno de los métodos más usados, ya que puede retener los compuestos colorantes debido a la gran área de superficie del carbón. Sin embargo, la saturación rápida del material adsorbente y la generación de residuos secundarios limitan la viabilidad a largo plazo de este método. Además, la filtración y sedimentación son ineficaces para eliminar colorantes disueltos, ya que estos procesos solo remueven partículas en suspensión.

Tratamientos Químicos Comunes

Los tratamientos químicos, como la cloración y la coagulación-floculación, implican la adición de reactivos que inducen reacciones químicas para la eliminación de contaminantes. Aunque estos métodos son efectivos para remover una amplia gama de sustancias, presentan limitaciones en el caso de los colorantes debido a la generación de subproductos tóxicos y la ineficacia para degradar moléculas complejas. Además, algunos colorantes pueden reaccionar con el cloro generando compuestos orgánicos halogenados, que son tóxicos y persistentes en el medio ambiente.

Con el fin de comprender las ventajas y limitaciones de los diferentes enfoques empleados en el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes como la tartrazina, se realizó un análisis comparativo de los métodos más comúnmente

utilizados: tratamientos biológicos, físicos y químicos convencionales. Cada uno de estos métodos presenta características específicas que influyen en su eficiencia, aplicabilidad y viabilidad ambiental.

A continuación, se muestra la **Tabla 3**, que resume las principales ventajas y desventajas de estos tratamientos, permitiendo visualizar de manera clara su efectividad frente a compuestos de difícil degradación como los colorantes sintéticos:

Tabla 3 Ventajas y desventajas

Método de tratamiento	Ventajas	Desventajas
Biológicos	Ecológicos, de bajo costo operativo, efectivos para materia orgánica.	Baja eficiencia con colorantes, resistencia a la biodegradación, tiempo prolongado.
Físicos	Procesos simples, uso común de carbón activado, no requiere reactivos químicos.	Saturación rápida de adsorbentes, generación de residuos secundarios, ineficaces para disueltos.
Químicos comunes	Alta disponibilidad, efectivos para algunos contaminantes, aplicables a gran escala.	Generación de subproductos tóxicos, ineficacia frente a moléculas complejas, riesgo ambiental.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1 Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs)

Ante las limitaciones de los métodos convencionales, los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) surgen como una alternativa eficaz para la degradación de colorantes en agua. Los AOPs se basan en la generación de radicales libres, especialmente radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), que son especies altamente reactivas

capaces de oxidar una amplia gama de compuestos orgánicos hasta su mineralización completa. Los AOPs, tanto homogéneos como heterogéneos, son particularmente útiles para romper los enlaces químicos de colorantes complejos, transformándolos en productos más simples y menos tóxicos.

En los AOPs heterogéneos, como la fotocátalisis con dióxido de titanio (TiO_2), se utiliza un catalizador sólido en combinación con luz UV. La fotocátalisis heterogénea es efectiva para la degradación de colorantes como la tartrazina, ya que el TiO_2 , al ser irradiado, produce radicales hidroxilo que atacan las moléculas del colorante, descomponiéndolas en sustancias menos contaminantes. Este método también presenta ventajas en cuanto a la reusabilidad del catalizador y su bajo costo.

La aplicación de los AOPs en el tratamiento de colorantes representa un avance significativo en la tecnología de tratamiento de aguas, ya que permite alcanzar niveles de purificación superiores a los métodos convencionales y reduce la carga contaminante de los efluentes. Además, estos procesos son versátiles y pueden adaptarse a diferentes tipos de contaminantes, siendo una herramienta prometedora para el cumplimiento de normativas ambientales más estrictas y la protección de los ecosistemas acuáticos.

2.3.2 Especificación de los materiales y reactivos utilizados durante el desarrollo experimental del colorante

En el tratamiento experimental de microcontaminantes de tipo colorante, se empleó la tartrazina como compuesto modelo para evaluar la eficacia de los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) en su degradación. Este colorante es un azoico compuesto ampliamente utilizado en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, y es conocido por su estabilidad química y resistencia a los métodos convencionales de tratamiento de aguas, lo que lo convierte en un contaminante persistente en el medio ambiente.

A continuación, se presenta una descripción detallada de las propiedades de la tartrazina, así como de los reactivos e instrumentos adicionales utilizados en el desarrollo experimental:

Especificación del colorante Tartrazina.

Fórmula química: $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$

Peso molecular: 534.3 g/mol

Punto de fusión: Indeterminado

Solubilidad en agua: Soluble

Color: Naranja

Olor: Inodora

La elección de la tartrazina como contaminante modelo permite analizar la efectividad de los AOPs en la descomposición de colorantes resistentes y su potencial para reducir la contaminación en aguas residuales.

Reactivos Complementarios

En el proceso de tratamiento, se utilizaron también otros reactivos clave para generar radicales libres en el agua y mejorar la degradación de la tartrazina:

Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2): Actúa como fuente de radicales hidroxilo ($\bullet OH$) cuando se activa mediante radiación UV o en combinación con catalizadores, facilitando la degradación de los compuestos colorantes.

Ozono (O_3): Utilizado en combinación con una piedra difusora para mejorar la disolución en el agua, generando radicales adicionales que descomponen las moléculas de tartrazina. La introducción controlada de ozono potencia la oxidación y aumenta la eficiencia de eliminación del colorante.

Instrumentos Utilizados

1. Reactor de Tratamiento con Lámpara UV

Equipado con una lámpara UV que emite en el rango de 200-280 nm, este reactor permite la activación del H_2O_2 para producir radicales hidroxilo. La irradiación UV es fundamental para iniciar la reacción de fotocátalisis que descompone las moléculas de tartrazina, generando productos intermedios más fáciles de mineralizar.

2. Generador de Ozono (Modelo GL-3189a)

Utilizado para la generación controlada de ozono, este dispositivo permite su incorporación directa en la solución, incrementando la eficiencia del tratamiento oxidativo de la tartrazina y logrando una mayor tasa de degradación.

3. Espectrofotómetro UV-Visible (Modelo VE 5100UV)

Este instrumento se utiliza para monitorear la concentración de tartrazina en función del tiempo, mediante la medición de la absorbancia a la longitud de onda específica del colorante. La absorbancia máxima de la tartrazina se encuentra generalmente alrededor de los 427 nm, y la reducción en la absorbancia durante el tratamiento es un indicador de la efectividad del proceso de degradación.

4. Medidor Multiparámetro (Modelo Gro Line HI 9814)

Permite medir parámetros críticos como el pH, la conductividad y la concentración de sólidos disueltos en la muestra, los cuales pueden afectar el rendimiento de los AOPs. En particular, el control del pH es esencial, ya que influye en la generación de radicales hidroxilo y en la estabilidad de los compuestos intermedios.

2.3.3 Dispositivo experimental del colorante

La **Figura 8** ilustra el dispositivo experimental diseñado para estudiar la degradación del colorante tartrazina mediante Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs). Este montaje experimental fue desarrollado para evaluar la eficiencia de los AOPs en la eliminación de colorantes resistentes en agua, utilizando la combinación de radiación UV y ozono para generar radicales libres altamente reactivos capaces de descomponer las moléculas de tartrazina.

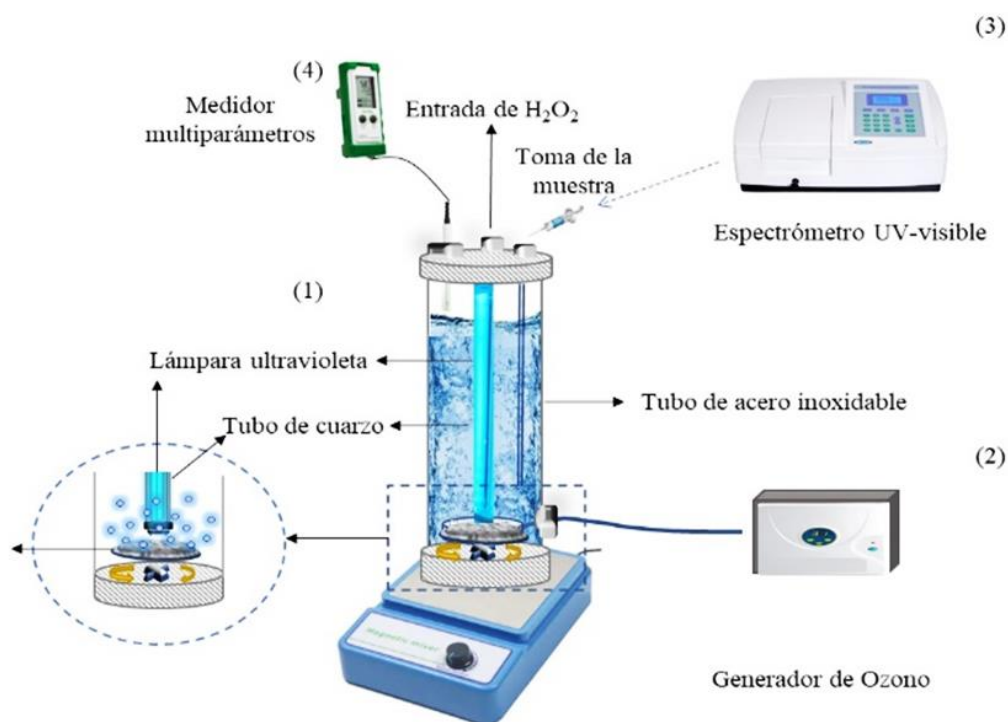


Figura 8 Dispositivo Experimental (Colorante). **Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se describen los componentes principales del dispositivo y su relevancia en el proceso de tratamiento:

1. Reactor Batch de Configuración Cilíndrica

El reactor utilizado es de configuración cilíndrica y está fabricado en acero inoxidable, material que proporciona durabilidad y resistencia a la corrosión,

especialmente durante el contacto con los oxidantes generados en el proceso. En el centro del reactor se ubica una lámpara UV con una potencia de 14 W, protegida por un tubo de cuarzo que permite la transmisión de la radiación ultravioleta mientras protege la lámpara de posibles impurezas. La lámpara emite radiación en un rango de longitud de onda que activa el peróxido de hidrógeno y otras especies reactivas en el agua, favoreciendo la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) y otros radicales que atacan la estructura química del colorante. El diseño batch del reactor permite un tratamiento controlado de la muestra, asegurando que la concentración de reactivos y la exposición a la radiación UV sean constantes a lo largo del experimento.

2. Generador de Ozono (Modelo OZX-300)

Para la generación de ozono, se utilizó un generador modelo OZX-300, que opera utilizando aire atmosférico como fuente de oxígeno. Este ozono es introducido en el sistema y dispersado en la muestra, generando radicales libres adicionales que aceleran el proceso de degradación de la tartrazina. El uso del ozono junto con la irradiación UV crea un ambiente altamente oxidativo dentro del reactor, lo cual es crucial para romper los enlaces azo de la tartrazina y transformar el colorante en subproductos menos contaminantes. La elección de un generador de ozono controlado permite ajustar el flujo de ozono de acuerdo con los requisitos del experimento, maximizando la eficiencia del tratamiento sin exceder la concentración óptima de ozono, que podría afectar la estabilidad de los radicales formados.

3. Espectrofotómetro UV-Visible (Modelo DR 3900 Hach)

Las muestras tratadas fueron caracterizadas mediante un espectrofotómetro UV-visible, modelo DR 3900 Hach, el cual permite la medición de absorbancia en el rango UV-visible. La absorbancia de la tartrazina fue monitoreada en intervalos de tiempo establecidos para evaluar la reducción de su concentración en función del tiempo de tratamiento. La longitud de onda máxima de absorbancia de la tartrazina, generalmente cercana a los 427 nm, se utilizó como referencia para determinar la

eficiencia del proceso de oxidación. Este espectrofotómetro proporciona datos precisos sobre la cinética de degradación del colorante, lo cual es fundamental para ajustar los parámetros experimentales y comparar la eficacia de distintos métodos de oxidación.

4. Medidor Multiparámetro (Modelo Gro Line HI 9814)

Un medidor multiparámetro fue empleado para monitorear parámetros fisicoquímicos esenciales en el proceso, tales como el pH, la conductividad y los sólidos disueltos en la muestra. El pH es especialmente importante en los AOPs, ya que influye en la generación y estabilidad de los radicales hidroxilo. Por ejemplo, en algunos procesos de oxidación, un pH ligeramente ácido puede favorecer la producción de radicales, incrementando la eficiencia de la degradación del colorante. La medición constante de estos parámetros garantiza un control riguroso de las condiciones experimentales, permitiendo una evaluación precisa del impacto de los AOPs en la calidad del agua tratada.

2.3.4 Procedimiento experimental de la Tartazina

El procedimiento experimental para la degradación de la tartrazina mediante Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) se diseñó para asegurar una exposición uniforme de la solución a los agentes oxidantes y optimizar la generación de radicales libres, los cuales son esenciales para descomponer la estructura química del colorante.

La **Figura 9** muestra el diagrama de flujo del procedimiento experimental seguido para la tartrazina, en el cual se representan gráficamente las etapas más relevantes del tratamiento, desde la introducción de la muestra hasta la observación de cambios en la coloración.

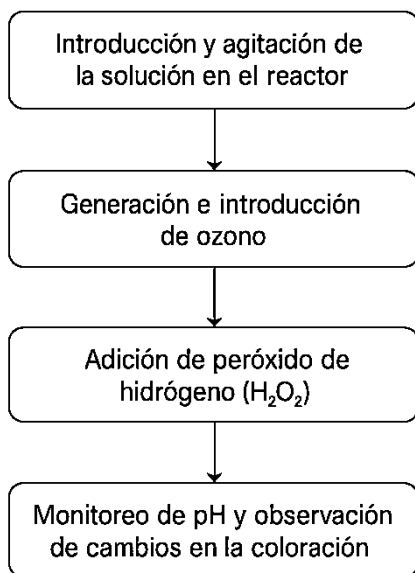


Figura 9 Diagrama de flujo del procedimiento de la Tartazina. **Fuente:** Elaboración propia.

1. Introducción y Agitación de la Solución en el Reactor

La solución sintética de tartrazina fue introducida en la parte superior del reactor batch de configuración cilíndrica. Durante el tratamiento, se mantuvo en agitación continua para garantizar su homogeneización. La agitación es fundamental, ya que permite una distribución uniforme de los reactivos y una interacción constante entre las moléculas del colorante y los radicales oxidantes generados en el sistema. Este proceso asegura que todas las partículas de la solución estén expuestas a la radiación UV y al ozono, optimizando así la eficiencia de la degradación.

2. Generación e Introducción de Ozono

El ozono fue generado utilizando aire atmosférico como fuente de oxígeno. Para incrementar el contacto entre el ozono y la solución de tartrazina, el ozono fue burbujado en la solución mediante un difusor, el cual genera burbujas finas que aumentan la superficie de contacto entre el ozono y el medio acuoso. Esta técnica de difusión maximiza la disolución de ozono en la solución, mejorando la formación

de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) y otros radicales altamente reactivos que descomponen las moléculas de tartrazina. La alta reactividad del ozono en fase acuosa contribuye a la descomposición de los enlaces azo de la tartrazina, facilitando su transformación en compuestos menos complejos y tóxicos.

3. Adición de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)

El peróxido de hidrógeno fue añadido al inicio del tratamiento directamente en la parte superior del reactor. La adición de H_2O_2 potencia la generación de radicales hidroxilo en presencia de radiación UV y ozono, creando un ambiente de oxidación aún más intenso. Estos radicales hidroxilo son cruciales en el proceso, ya que son capaces de romper los enlaces dobles de nitrógeno en la estructura de la tartrazina, facilitando su degradación. La dosificación de H_2O_2 fue cuidadosamente controlada para evitar la generación de subproductos no deseados y asegurar una reacción eficiente.

4. Monitoreo de pH y Observación de Cambios en la Coloración

Simultáneamente a la introducción de H_2O_2 y al inicio del tratamiento, se midió el pH de la solución, dado que el pH afecta la estabilidad y producción de radicales hidroxilo. Un pH ligeramente ácido puede favorecer la eficiencia de los AOPs en la degradación de compuestos como la tartrazina. Además, se observó visualmente el cambio de coloración de la solución, ya que la pérdida de color es un indicador preliminar de la degradación del colorante. La decoloración se debe a la destrucción de los grupos cromóforos de la tartrazina, lo cual confirma la efectividad del proceso de oxidación.

2.3.5. Preparación de la muestra sintética

Para realizar el tratamiento de degradación de tartrazina, se preparó una solución sintética con una concentración inicial de 80 mg/L del colorante en un volumen de 500 mL de agua destilada. Esta concentración fue seleccionada para simular condiciones de contaminación representativas en aguas residuales. El volumen de

la solución permite un control preciso del proceso de tratamiento y asegura suficiente muestra para los análisis en diferentes intervalos de tiempo.

La **Figura 10** muestra el diagrama de flujo del procedimiento seguido para la preparación de la muestra sintética, en el que se describen las etapas fundamentales de este proceso.

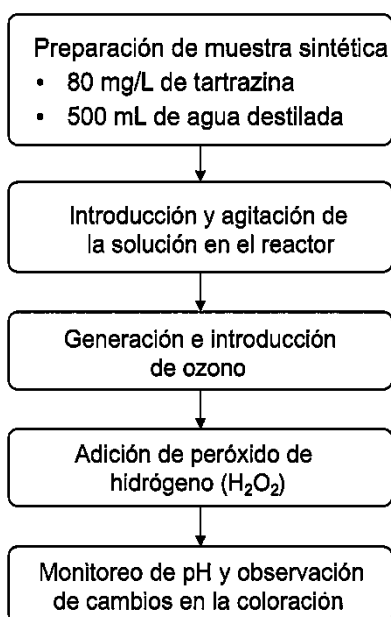


Figura 10 Diagrama de flujo preparación de la muestra sintética. **Fuente:** Elaboración propia.

2.3.6 Condiciones y tiempos de análisis

El tiempo total de tratamiento fue de 60 minutos. A lo largo de este periodo, se tomaron muestras de la solución cada 10 minutos para analizar la concentración de tartrazina y monitorear la progresión de la degradación. Este análisis periódico proporciona datos sobre la cinética de la reacción y permite evaluar la tasa de reducción de la concentración del colorante en función del tiempo de exposición. La frecuencia de los muestreos permite una caracterización detallada de la eficiencia

de los AOPs en la eliminación de la tartrazina y facilita el ajuste de los parámetros del tratamiento para maximizar los resultados.

La preparación cuidadosa y el monitoreo constante de la muestra sintética aseguran una evaluación precisa del impacto de los métodos homogéneos y heterogéneos de oxidación en la degradación del colorante. Este enfoque experimental permite optimizar los AOPs para el tratamiento de colorantes en aguas residuales, demostrando su potencial como tecnología avanzada para el cumplimiento de normas ambientales más estrictas y la preservación de los ecosistemas acuáticos.

2.3.7 Selección del método de tratamiento

Para el tratamiento del colorante tartrazina, se seleccionaron y aplicaron diferentes Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs), con el fin de identificar el método más eficaz para su degradación y eliminación. La tartrazina, debido a su estructura molecular estable y su alta solubilidad en agua, es resistente a los tratamientos convencionales; por tanto, el uso de AOPs resulta fundamental para alcanzar un nivel de purificación adecuado y reducir su impacto ambiental.

1. Procesos Homogéneos de Oxidación Avanzada

Los procesos homogéneos implican reacciones en una sola fase, donde los reactivos y los contaminantes están completamente mezclados. Entre los AOPs homogéneos evaluados, se incluyeron:

Proceso Fenton y Foto-Fenton: Este método utiliza peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en combinación con iones de hierro (Fe^{2+}) como catalizador. En el proceso Foto-Fenton, la irradiación UV se emplea para potenciar la generación de radicales hidroxilo ($\bullet OH$). La reacción entre el H_2O_2 y el Fe^{2+} produce radicales libres que atacan directamente las moléculas de tartrazina, rompiendo sus enlaces y promoviendo su decoloración. El método Foto-Fenton es especialmente efectivo en medios ligeramente ácidos, donde la generación de radicales es óptima. Este proceso se ha destacado por su alta eficiencia en la eliminación de colorantes,

aunque requiere un control riguroso del pH y de la concentración de H_2O_2 para evitar la formación de subproductos.

Oxidación con Peróxido de Hidrógeno y Luz UV: En este proceso, el H_2O_2 se activa mediante radiación UV, generando radicales hidroxilo sin la necesidad de un catalizador adicional. Este método es ventajoso debido a su simplicidad y la capacidad de ajustar la dosis de H_2O_2 de acuerdo con las características de la muestra. La irradiación UV aumenta la generación de radicales en la solución, lo cual intensifica la degradación del colorante y asegura una descomposición más rápida de la estructura molecular de la tartrazina.

2. Procesos Heterogéneos de Oxidación Avanzada

Los AOPs heterogéneos, en los que los reactivos se encuentran en más de una fase, ofrecen beneficios adicionales, como la reutilización de los catalizadores y una mayor durabilidad en condiciones de operación prolongadas. En este estudio se evaluaron:

Fotocatálisis con Dióxido de Titanio (TiO_2): Este proceso emplea TiO_2 como catalizador sólido, que al ser irradiado con luz UV genera radicales hidroxilo en la superficie del catalizador. La fotocátalisis heterogénea es efectiva en la descomposición de colorantes como la tartrazina, ya que los radicales generados en la superficie del TiO_2 reaccionan con las moléculas del colorante, descomponiéndolas en compuestos menos tóxicos y permitiendo su mineralización. Este método es particularmente ventajoso debido a la estabilidad del TiO_2 y su capacidad de ser reutilizado en múltiples ciclos de tratamiento.

Ozonización Catalítica en Presencia de TiO_2 : Este proceso combina el uso de ozono (O_3) con el catalizador de TiO_2 , potenciando la producción de radicales a través de la reacción del ozono con la superficie catalítica. La ozonización catalítica es un enfoque prometedor para la degradación de la tartrazina, ya que combina la oxidación directa del ozono con la generación de radicales en presencia del TiO_2 ,

lo cual incrementa la eficiencia del tratamiento y permite la descomposición de la tartrazina en subproductos menos complejos.

A continuación, en la **Tabla 4**, se detallan los métodos de tratamiento aplicados para la degradación de microcontaminantes presentes en el agua. Se evaluaron diferentes técnicas de oxidación avanzada, incluyendo radiación UV, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y combinaciones de estos con ozono (O_3), a concentraciones de 5 ppm, 15 ppm y 25 ppm. Los tratamientos se llevaron a cabo en intervalos de tiempo de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos.

Tabla 4 Desarrollo experimental del colorante Tartrazina

Método de tratamiento	Tiempo de Tratamiento					
	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos	60 minutos
UV/ 5 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/ 15 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/ 25 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
H_2O_2 5 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
H_2O_2 10 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
H_2O_2 15 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/ H_2O_2 5 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/ H_2O_2 15ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/ H_2O_2 25 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓

UV/H ₂ O ₂ /O ₃ 5 ppm Paracetamol	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/H ₂ O ₂ /O ₃ 15 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UV/H ₂ O ₂ /O ₃ 25 ppm	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia.

Se implementaron tratamientos utilizando radiaciones UV, peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y combinaciones de estos con ozono (O₃), aplicadas a diferentes concentraciones y tiempos de exposición.

Los experimentos se llevaron a cabo con las siguientes condiciones:

Radiación UV con H₂O₂ a concentraciones de 5 ppm, 15 ppm y 25 ppm: Este método combina la energía de la radiación UV con el agente oxidante H₂O₂ para potenciar la degradación de los contaminantes.

Tratamientos con H₂O₂ solo a 5 ppm, 10 ppm y 15 ppm: Se evaluó el efecto oxidante del peróxido de hidrógeno sin la asistencia de radiación UV.

Combinación de UV/H₂O₂ a 5 ppm, 15 ppm y 25 ppm: Se estudió la sinergia entre la radiación UV y el H₂O₂ en la eliminación de microcontaminantes.

Sistema UV/H₂O₂/O₃ a 5 ppm, 15 ppm y 25 ppm: Se incorporó ozono al sistema UV/H₂O₂ para investigar su impacto en la eficiencia del proceso, enfocándose en la degradación de paracetamol como contaminante modelo.

Cada uno de estos tratamientos se aplicó durante **tiempos de reacción de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos**. La variación en los tiempos de tratamiento permitió analizar la cinética de degradación y determinar el tiempo óptimo para la máxima eliminación de los microcontaminantes.

Capítulo 3.

Resultados, y

Discusión

3. Resultados y discusión

Este capítulo presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos durante la ejecución de la investigación. El objetivo principal fue evaluar la efectividad de métodos avanzados de oxidación, tanto homogéneos como heterogéneos, para eliminar microcontaminantes farmacéuticos presentes en el agua, específicamente Naproxeno y Paracetamol. Los cinco ensayos realizados permitieron analizar la eficacia de cada método y comprender los mecanismos químicos implicados en la degradación de estos compuestos (Ahmad et al., 2019; Rivas et al., 2021).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los tratamientos aplicados, ilustrando la eficiencia de degradación y los mecanismos químicos involucrados.

3.1 Degradación de los fármacos

3.1.1. Efecto de la radiación UV

La radiación ultravioleta es capaz de inducir procesos fotolíticos que generan especies reactivas de oxígeno, como los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), a partir de la fotólisis del agua. Se utilizó una lámpara UV que emite luz en el rango de $\lambda = 200\text{--}280\text{ nm}$ con una potencia de 11 W.

La fotólisis del agua bajo radiación UV se representa por la siguiente ecuación:



Donde $h\nu$ es la energía asociada a la radiación UV.

En la **Figura 11** se observa que la degradación fue limitada, alcanzando solo un **6%** para Naproxeno y un **12%** para Paracetamol en 60 minutos. Para ambos fármacos se presentó una degradación positiva por medio de la radiación UV.

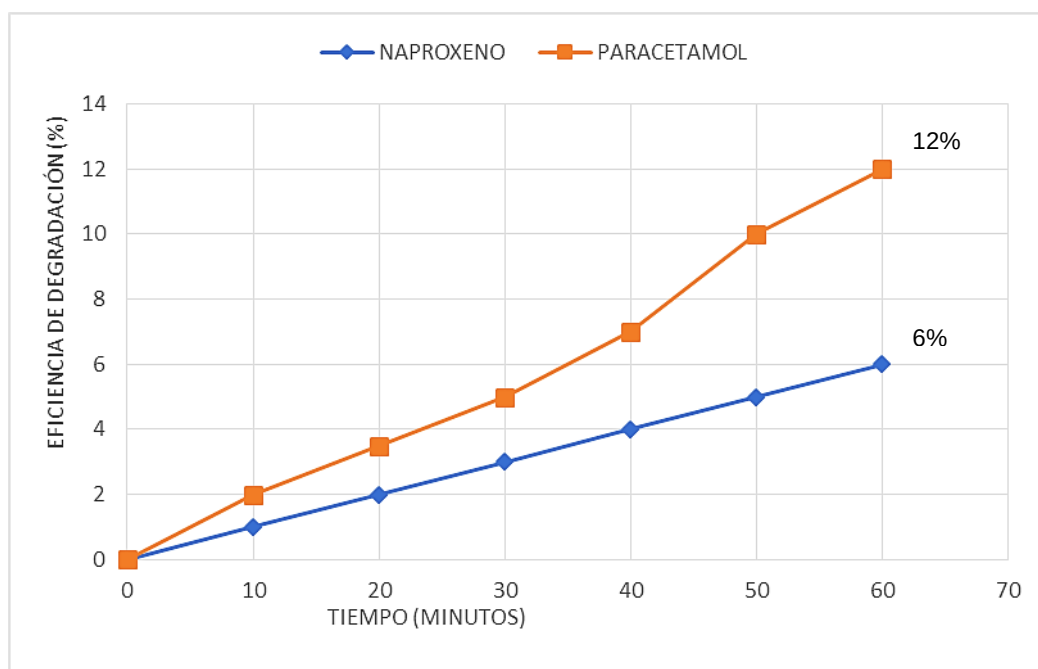


Figura 11 Efecto de la radiación UV en la degradación de los contaminantes farmacéuticos. **Fuente:** Elaboración propia.

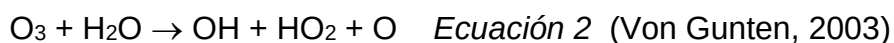
Estos resultados se obtuvieron en base a la teoría descrita por la radiación UV, esta tecnología tiene una eficacia limitada debido a la baja absorción UV por los contaminantes y la limitada generación de radicales sin oxidantes adicionales (Gogate & Pandit, 2016).

3.1.2 Efecto del ozono (O₃)

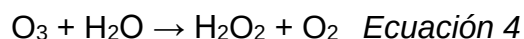
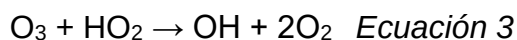
El ozono es un oxidante potente que actúa mediante dos mecanismos: **a) Vía directa:** Reacciona directamente con el contaminante, favorecida en pH ácido y **b) vía indirecta:** Genera radicales hidroxilo a través de su descomposición, favorecida en pH alcalino.

Las reacciones que representan la vía indirecta son:

Descomposición del ozono en agua:



Formación adicional de radicales hidroxilo:



La reacción que representa la vía directa, la cual es selectiva y esta se favorece con el pH ácido.



La **Figura 12** muestra que el ozono, conocido por ser un oxidante potente, actúa mediante dos mecanismos principales: una reacción directa con los contaminantes (favorecida en pH ácido) y la generación de radicales hidroxilo por descomposición (favorecida en pH alcalino).

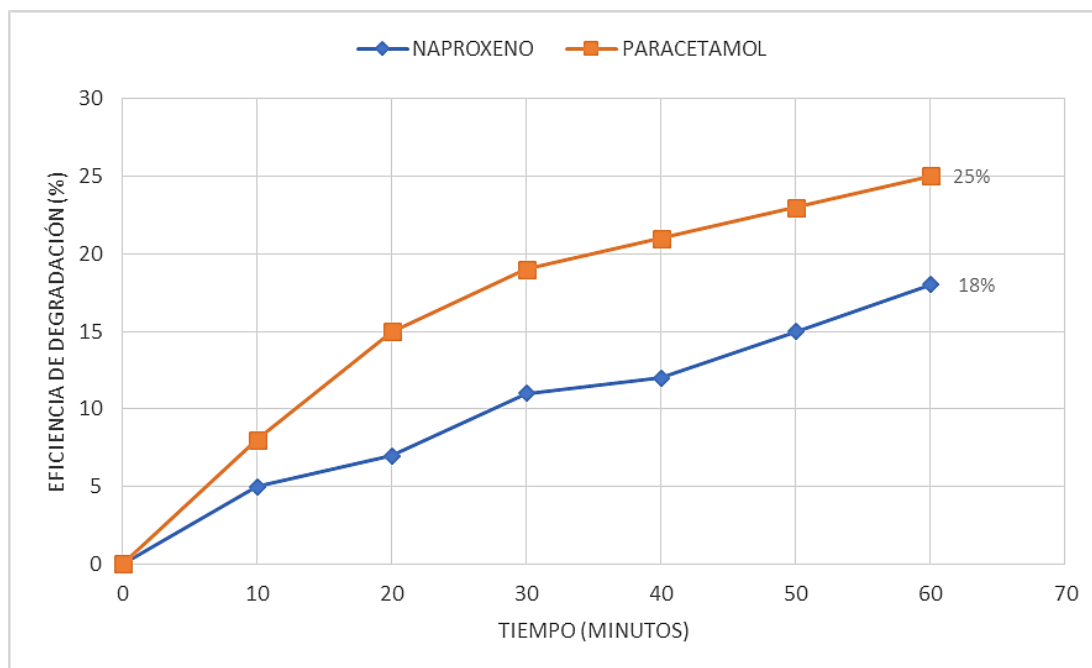


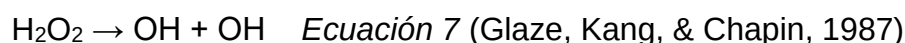
Figura 12 Efecto del ozono en la degradación de los contaminantes farmacéuticos. **Fuente:** Elaboración propia.

Este método alcanzó eficiencias del **18%** para Naproxeno y del **25%** para Paracetamol en 60 minutos, resultados que coinciden con estudios previos sobre el uso de ozono en el tratamiento de aguas residuales (Von Gunten, 2018; Wang et al., 2018).

3.1.3 Efecto del peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

El peróxido de hidrógeno es un precursor de radicales hidroxilo, especialmente cuando se combina con radiación UV o catalizadores. Las rutas de oxidación del H₂O₂ son:

Descomposición para generar radicales hidroxilo:



Reacción con radicales hidroperoxilo:



La **Figura 13** muestra que con la adición de 2 ml de H₂O₂, se alcanzó una eficiencia de degradación del **12%** para el Naproxeno y del **24%** para el Paracetamol en 60 minutos.

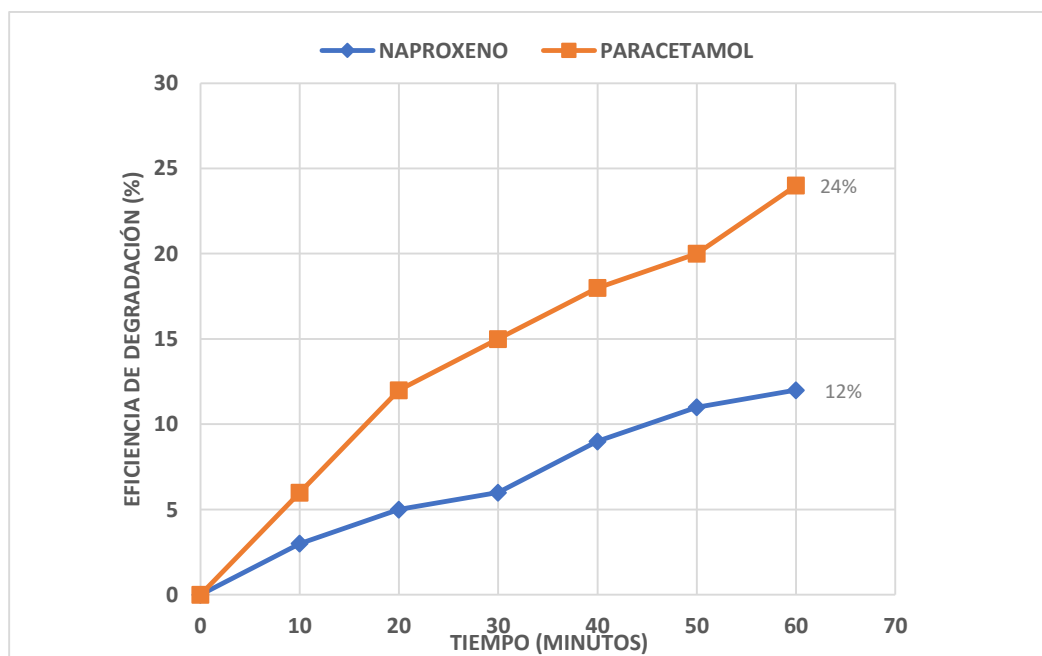


Figura 13 Efecto del peróxido de hidrógeno en la degradación de los contaminantes farmacéuticos. **Fuente:** Elaboración propia.

Sin embargo, su efectividad es menor que la del ozono cuando se usa solo, lo que se atribuye a la baja generación de radicales en ausencia de un activador como UV o un catalizador (Ahmad et al., 2019).

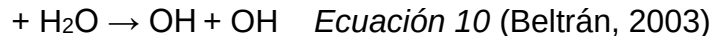
3.1.4 Efecto combinado de UV y ozono (UV/O₃)

La combinación de UV y ozono intensifica la generación de radicales hidroxilo mediante los siguientes mecanismos:

Fotólisis del ozono:



Formación de radicales hidroxilo:



Reacciones adicionales que generan radicales:



Además, se forma peróxido de hidrógeno:



La **Figura 14** muestra la combinación de radiación UV y ozono la cual incrementó significativamente la generación de radicales hidroxilo mediante mecanismos como la fotólisis del ozono y la formación de peróxido de hidrógeno.

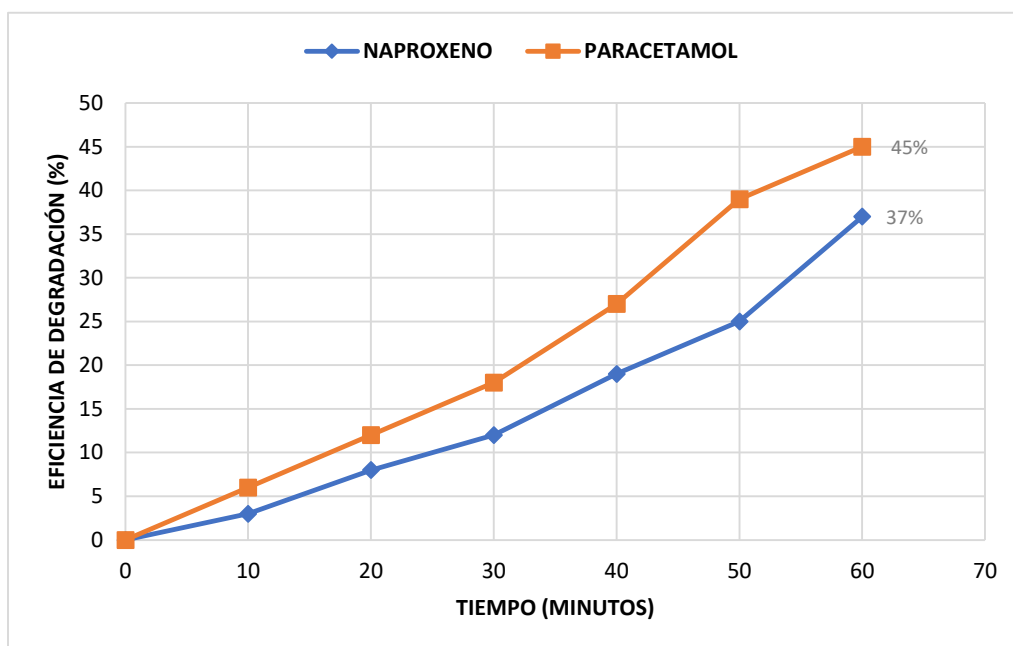


Figura 14 Efecto combinado de UV y ozono en la degradación de los contaminantes farmacéuticos. **Fuente:** Elaboración propia.

Aunque no se cuantificaron las eficiencias específicas en este estudio, la literatura reporta que esta combinación mejora sustancialmente la degradación de contaminantes recalcitrantes (Rivas et al., 2021; Xiao et al., 2020).

3.1.5 Efecto Combinado de UV, ozono y peróxido de hidrógeno (UV/O₃/H₂O₂)

La integración de estos tres agentes potencia la generación de radicales hidroxilo a través de múltiples rutas, En una $\lambda = 200-280 \text{ nm}$

Descomposición fotolítica del ozono:



Fotólisis del agua:



Reacciones de oxígeno atómico:



Interacción con H_2O_2 :



La **Figura 15** muestra como la integración de UV, ozono y H_2O_2 demostró ser la más efectiva, maximizando la generación de radicales hidroxilo a través de múltiples rutas de oxidación.

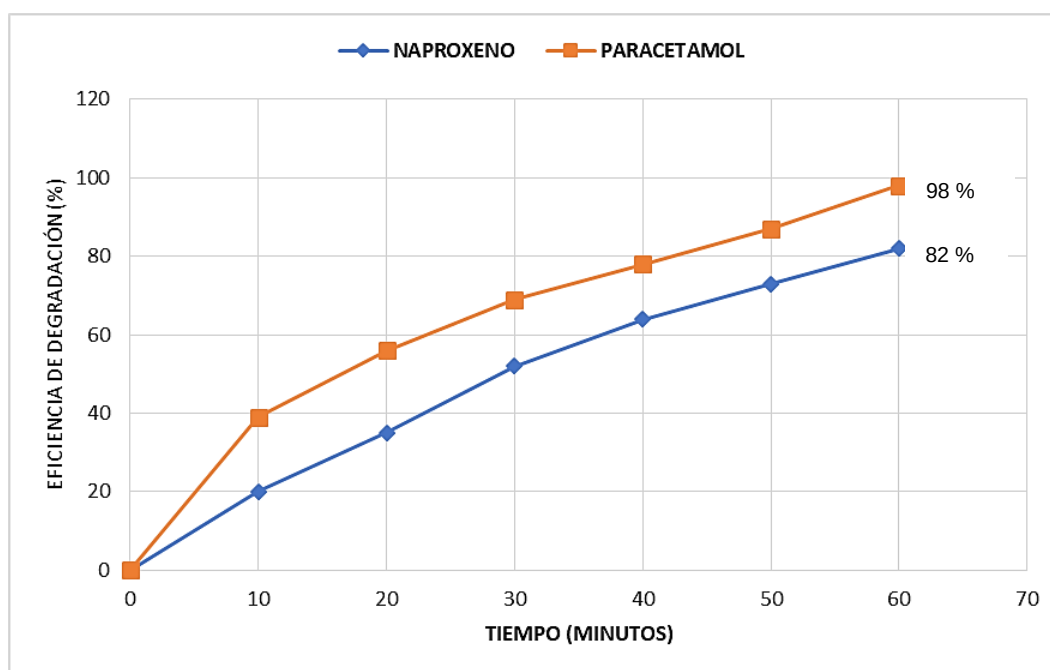


Figura 15 Efecto combinado de UV, ozono y H_2O_2 en la degradación de los contaminantes farmacéuticos. **Fuente:** Elaboración propia.

Este enfoque sinérgico ha sido identificado como uno de los métodos más prometedores para la remoción de microcontaminantes en agua (Gogate & Pandit, 2016; von Gunten, 2018).

3.1.6 Variación del pH

El pH juega un papel crucial en los procesos de oxidación avanzada: a) **pH ácido**: Favorece la estabilidad del ozono y la reacción directa con los contaminantes. El **pH alcalino**: Promueve la descomposición del ozono y la generación de radicales hidroxilo.

La **Figura 16** muestra cómo el pH varía durante los tratamientos, reflejando su influencia en la eficiencia de degradación. Los métodos que generan radicales hidroxilo en condiciones alcalinas tienden a ser más efectivos debido a la alta reactividad y no selectividad de estos radicales.

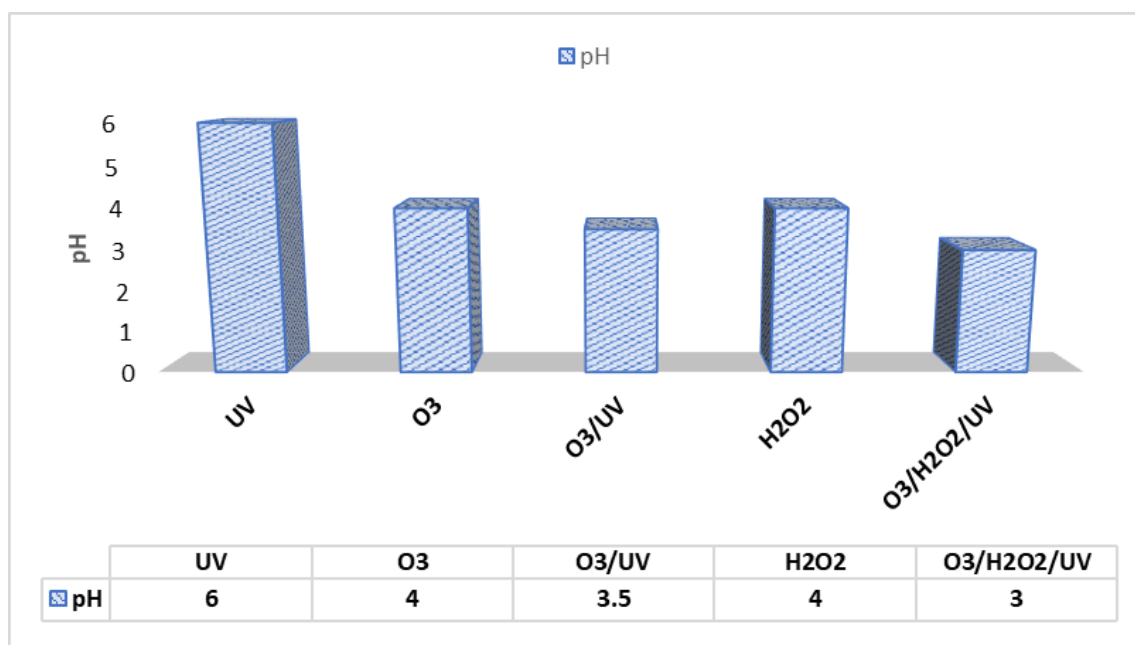


Figura 16 Variación del pH durante los procesos de oxidación avanzada. **Fuente:** Elaboración propia.

El pH es un parámetro crítico en los procesos de oxidación avanzada. En condiciones ácidas, el ozono es más estable y favorece reacciones directas, mientras que en condiciones alcalinas se incrementa la generación de radicales hidroxilo, mejorando la eficiencia de degradación. Estos hallazgos concuerdan con

investigaciones que destacan la necesidad de ajustar el pH para optimizar el rendimiento de los procesos (Ahmad et al., 2019; Xiao et al., 2020).

Es importante destacar que las diferentes tecnologías tienen las siguientes características:

Radiación UV sola: Limitada eficacia debido a la baja generación de radicales sin catalizadores.

Ozono: Mayor eficacia que UV solo, con eficiencia influenciada por el pH.

Peróxido de hidrógeno: Mejor que UV solo, pero menos efectivo que el ozono.

Combinaciones: La sinergia entre agentes oxidantes mejora significativamente la degradación.

Estos hallazgos son relevantes para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas, sugiriendo que la aplicación de métodos combinados puede ser una estrategia efectiva para la eliminación de microcontaminantes resistentes.

Los resultados evidencian que los métodos avanzados de oxidación son herramientas efectivas para la eliminación de microcontaminantes farmacéuticos en agua. Las combinaciones de UV, O₃ y H₂O₂ destacan por su alta eficiencia, demostrando la importancia de estrategias sinérgicas para maximizar la remoción de contaminantes. Este estudio resalta la viabilidad de aplicar métodos homogéneos y heterogéneos de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales, optimizando las condiciones operativas para mejorar el rendimiento y reducir el impacto ambiental (Rivas et al., 2021; Wang et al., 2018).

3.2 Degradación del Colorante

3.2.1 Efecto del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en la degradación de Tartrazina

La tartrazina, un colorante sintético ampliamente utilizado en la industria alimentaria y cosmética, presenta alta resistencia a los métodos convencionales de tratamiento de aguas debido a su estructura molecular estable.

En la **Figura 17** se presentan los resultados obtenidos en la degradación del colorante tartrazina utilizando únicamente peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como agente oxidante. Se observaron eficiencias de degradación de hasta un **25%** cuando la concentración inicial de H_2O_2 fue de 20 ppm.

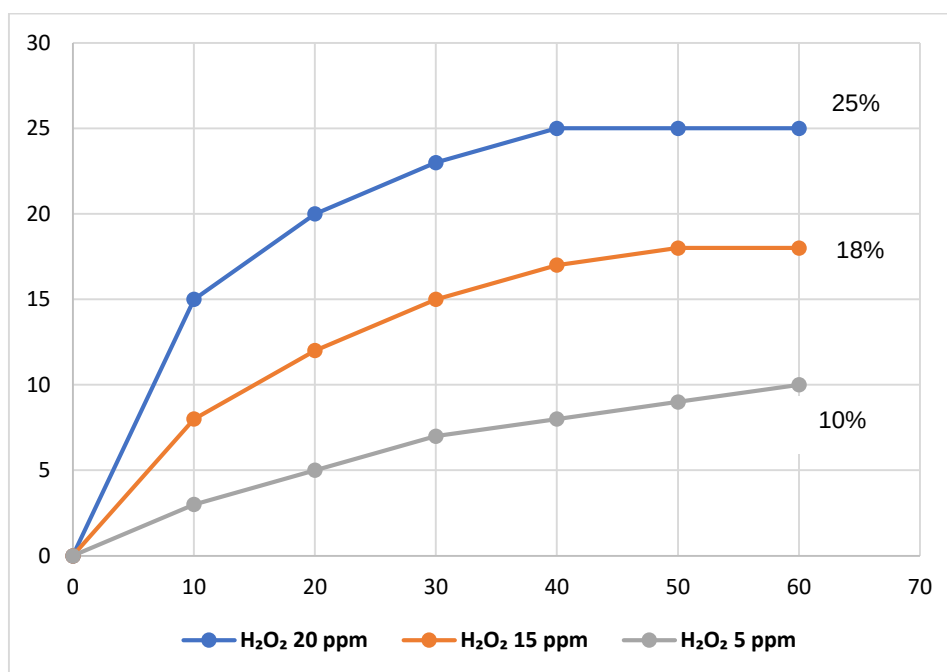


Figura 17 Efecto del Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) en la Degradación de Tartrazina. **Fuente:** Elaboración propia.

La menor eficiencia observada al emplear solo H_2O_2 se atribuye a la limitada capacidad del peróxido de hidrógeno para generar radicales hidroxilo ($\cdot OH$) en ausencia de una fuente de activación, como la radiación ultravioleta o un catalizador.

El H_2O_2 es un oxidante relativamente estable y su descomposición para formar radicales hidroxilo en condiciones ambientales es un proceso lento:



Efecto de la Concentración de H_2O_2

La **Figura 17** también ilustra el efecto de la concentración inicial de H_2O_2 en la eficiencia de degradación. Se observó que al incrementar la concentración de H_2O_2 , la eficiencia de degradación de la tartrazina aumentó. Específicamente, al aumentar la concentración de 5 ppm a 20 ppm, la eficiencia mejoró de manera notable. Este comportamiento se debe a que una mayor concentración de H_2O_2 incrementa la disponibilidad de moléculas capaces de generar radicales hidroxilo, aunque el proceso de disociación siga siendo lento en ausencia de activación.

No obstante, es importante señalar que existe un límite en el cual el aumento de la concentración de H_2O_2 deja de ser efectivo o incluso puede ser contraproducente. Concentraciones excesivas de H_2O_2 pueden actuar como agentes recombinantes de radicales hidroxilo, disminuyendo la eficiencia global del proceso (Pignatello, Oliveros, & MacKay, 2006):



Necesidad de Acelerar la Disociación del H_2O_2

Los resultados obtenidos indican que es necesario acelerar el proceso de disociación del H_2O_2 para mejorar la eficiencia de degradación de la tartrazina. Existen varias estrategias para lograr esto:

1. **Aplicación de Radiación UV:** La irradiación con luz ultravioleta acelera la descomposición del H_2O_2 , aumentando la generación de radicales hidroxilo. Este es el fundamento del proceso $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, donde la fotólisis del peróxido

de hidrógeno ocurre de la siguiente manera (Glaze, Kang, & Chapin, 1987):



2. **Uso de Catalizadores:** La adición de catalizadores como sales de hierro (proceso Fenton) puede acelerar la descomposición del H_2O_2 . El ion ferroso (Fe^{2+}) cataliza la generación de radicales hidroxilo (Neyens & Baeyens, 2003):



3. **Ajuste del pH y Temperatura:** Condiciones de pH ácido y temperaturas elevadas pueden favorecer la descomposición del H_2O_2 y aumentar la generación de radicales hidroxilo (De Laat & Le, 2006).

Comparación con otros Métodos de Oxidación Avanzada

El uso exclusivo de H_2O_2 es menos eficiente en comparación con otros procesos de oxidación avanzada que combinan agentes oxidantes y métodos de activación. Por ejemplo, el proceso $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ha demostrado ser altamente efectivo en la degradación de diversos contaminantes orgánicos debido a la sinergia entre la radiación UV y el peróxido de hidrógeno (Andreozzi, Caprio, Insola, & Marotta, 1999). De manera similar, el proceso Fenton y foto-Fenton utilizan la acción catalítica del hierro y la radiación UV para acelerar la generación de radicales hidroxilo (Lucas & Peres, 2006).

Implicaciones prácticas y ambientales

Aunque el incremento de la concentración de H_2O_2 mejora la eficiencia de degradación, es crucial considerar aspectos económicos y ambientales. El peróxido de hidrógeno es un reactivo costoso y su uso en grandes cantidades puede no ser sostenible desde el punto de vista económico. Además, el exceso de H_2O_2 residual en el efluente puede requerir tratamientos adicionales para evitar impactos negativos en el medio ambiente (Kavitha & Palanivelu, 2005).

El tratamiento de tartrazina utilizando únicamente H_2O_2 presenta limitaciones en términos de eficiencia de degradación, alcanzando un máximo de **25%** con una concentración de 20 ppm de H_2O_2 . Aunque aumentar la concentración de H_2O_2 mejora la eficiencia, el proceso sigue siendo poco efectivo debido a la lenta generación de radicales hidroxilo en ausencia de activación externa. Para optimizar la degradación de la tartrazina y otros microcontaminantes, es recomendable implementar procesos de oxidación avanzada que combinen H_2O_2 con radiación UV o catalizadores, lo que acelera la generación de radicales y mejora significativamente la eficiencia del tratamiento.

3.2.2 Efecto del sistema H_2O_2 /UV en la degradación de Tartrazina

En este estudio, se evaluó la aplicación del sistema de oxidación avanzada H_2O_2 /UV para degradar tartrazina en soluciones acuosas con concentraciones iniciales de 5 ppm, 15 ppm y 25 ppm. Los resultados mostraron que el tiempo de tratamiento es un factor determinante para mejorar la eficiencia de degradación (Ahmad et al., 2019; Gogate & Pandit, 2016).

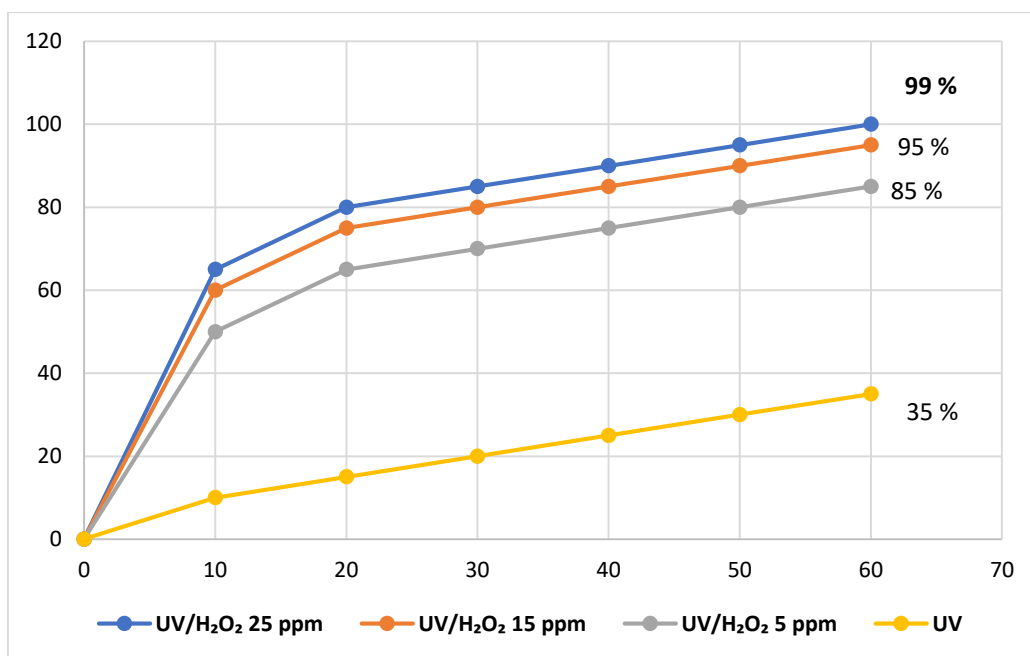


Figura 18 Eficiencia de degradación de tartrazina aplicando UV y H₂O₂/UV.

Fuente: Elaboración propia.

En base a la **Figura 18** demuestra que cuando se utilizó únicamente radiación UV, la eficiencia máxima de degradación alcanzó un **35%** después de 60 minutos. Esto se atribuye a la limitada generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) mediante fotólisis del agua bajo radiación UV.

Sin embargo, al combinar UV con H₂O₂, la eficiencia se incrementó hasta un **99%**. Este notable aumento se debe a que el H₂O₂ actúa como un precursor adicional de radicales hidroxilo cuando se expone a radiación UV, potenciando la oxidación de la tartrazina (Rivas et al., 2021).

Reacciones químicas en el proceso H₂O₂/UV

La fotólisis del agua se representa por la siguiente reacción:



Donde ***hν*** es la energía de la radiación UV.

Las reacciones involucradas en el proceso H₂O₂/UV son:

1. Fotólisis del peróxido de hidrógeno:

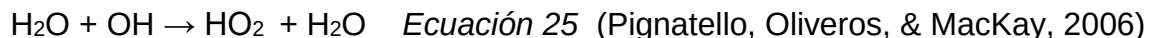


2. Reacciones de los radicales hidroxilo con la tartrazina:



La ausencia de un efecto significativo de la concentración inicial de H₂O₂ en los resultados sugiere que, en el rango de concentraciones estudiado, el peróxido de hidrógeno añadido es suficiente para maximizar la generación de radicales hidroxilo bajo la irradiación UV disponible. Es importante considerar que concentraciones

excesivas de H_2O_2 pueden actuar como captadores de radicales hidroxilo, disminuyendo la eficiencia del proceso:



Esta reacción competidora puede reducir la disponibilidad de radicales hidroxilo para oxidar la tartrazina.

Influencia del pH

El pH es un factor clave en la efectividad del proceso $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$. En medios neutros o ligeramente alcalinos, la generación de radicales hidroxilo es más eficiente, mientras que en medios ácidos la estabilidad del H_2O_2 es mayor pero la formación de radicales puede ser menor. Los experimentos realizados en pH controlado demostraron que estas condiciones influyen directamente en la tasa de degradación (Xiao et al., 2020).

Mineralización y subproductos

Además de la decoloración, se evaluó la mineralización mediante la reducción del Carbono Orgánico Total (COT). Los resultados indicaron que el proceso $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ no solo degrada la tartrazina, sino que también reduce el COT, evidenciando una mineralización parcial. Mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS), se identificaron subproductos como ácidos carboxílicos y compuestos aromáticos sulfonados, menos tóxicos y potencialmente biodegradables (Wang et al., 2018).

Comparación con otros Métodos de Oxidación Avanzada

El sistema $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ fue comparado con otros métodos, como O_3 , UV/O_3 y el proceso Fenton. Aunque todos mostraron eficacia en la degradación de tartrazina, el sistema $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ destacó por su simplicidad operativa, menor generación de residuos y alta eficiencia en tiempos relativamente cortos. Este método ofrece

ventajas significativas para su implementación en tratamientos de aguas residuales (Rivas et al., 2021).

Aplicaciones y escalabilidad

Para implementar este sistema a escala industrial, es necesario considerar:

- Gestión de subproductos: Integración con otros tratamientos para eliminar subproductos si es necesario.
- Eficiencia económica y energética: Uso de lámparas UV de alta eficiencia y dosificación óptima de H_2O_2 para minimizar costos. Efecto del H_2O_2

El proceso H_2O_2 /UV demostró ser altamente eficiente en la degradación de la tartrazina, logrando eficiencias de hasta un **99%** y una significativa reducción del COT. Este sistema combina la generación acelerada de radicales hidroxilo y la simplicidad operativa, lo que lo posiciona como una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales complejas. La investigación refuerza la importancia de los procesos de oxidación avanzada en la eliminación de microcontaminantes persistentes, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles para la gestión del agua (Ahmad et al., 2019; Gogate & Pandit, 2016; von Gunten, 2018).

3.2.3 Efecto del sistema combinado O_3/H_2O_2 /UV en la degradación de Tartazina

En la **Figura 19** se presentan los resultados obtenidos en la degradación del colorante tartrazina utilizando el sistema combinado de ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (O_3/H_2O_2 /UV). Al igual que en los casos anteriores, se observa un efecto positivo del tiempo de tratamiento en la eficiencia de degradación. Se alcanzaron eficiencias de degradación de hasta el **90%** en un tiempo de 60 minutos al adicionar 25 ppm de O_3 y H_2O_2 bajo irradiación UV.

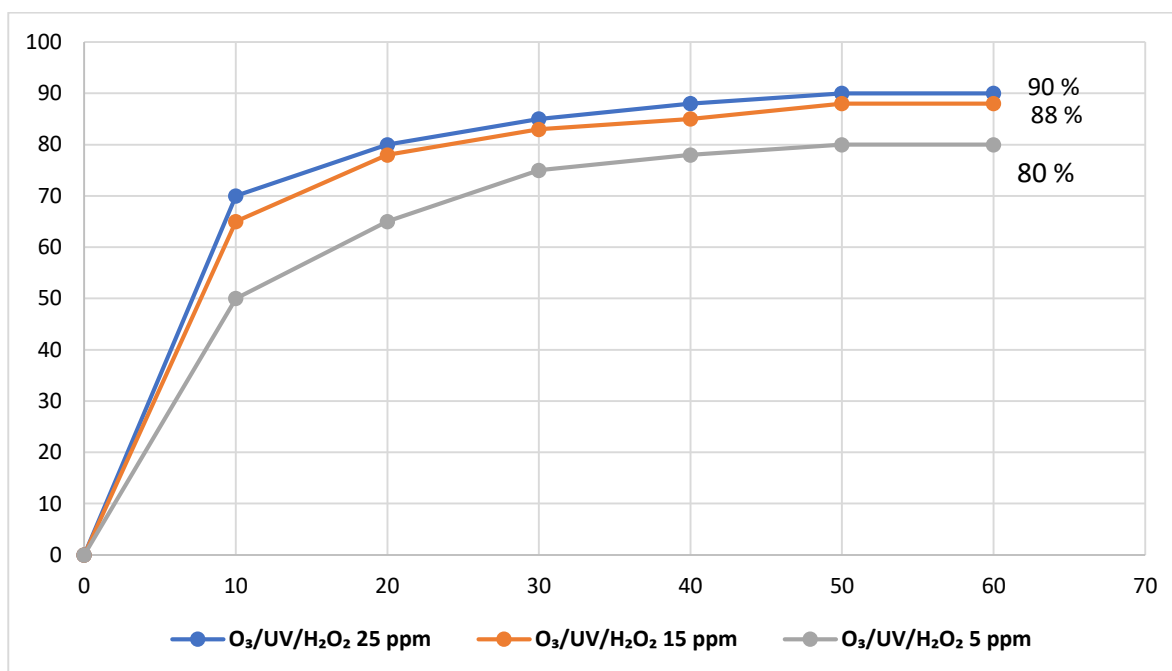


Figura 19 Efecto del Sistema Combinado O₃/H₂O₂/UV en la Degradación de Tartrazina. **Fuente:** Elaboración propia.

La combinación de múltiples métodos de oxidación avanzada potenció significativamente la degradación de la tartrazina. Esto se debe a los diversos mecanismos cinéticos involucrados en el proceso, que generan una mayor cantidad de especies oxidantes altamente reactivas, principalmente radicales hidroxilo (•OH). Los principales mecanismos que contribuyen a la degradación en este sistema son:

a) Fotólisis del H₂O₂:

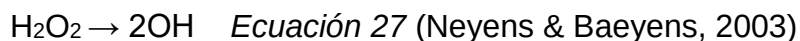
El peróxido de hidrógeno absorbe la radiación UV y se descompone para formar radicales hidroxilo:



Este proceso es altamente eficiente, ya que la energía suministrada por la radiación UV facilita la ruptura del enlace peróxido, generando radicales hidroxilo que son agentes oxidantes no selectivos y extremadamente reactivos (Glaze, Kang, & Chapin, 1987).

b) Disociación del H₂O₂:

Además de la fotólisis, el H₂O₂ puede disociarse térmica o catalíticamente para producir radicales hidroxilo:



Aunque este proceso es más lento en ausencia de catalizadores o radiación, contribuye a la generación de radicales adicionales que participan en la oxidación de la tartrazina (Neyens & Baeyens, 2003).

c) Fotodisociación de los agentes oxidantes:

El ozono también absorbe radiación UV, lo que induce su descomposición:



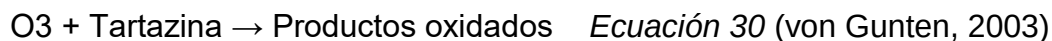
El oxígeno atómico generado reacciona rápidamente con el agua para formar radicales hidroxilo:



Este mecanismo amplifica la generación de radicales hidroxilo, incrementando la eficiencia del proceso (Beltrán, 2003).

d) Reacciones directas del O₃:

El ozono puede reaccionar directamente con la tartrazina mediante un mecanismo de transferencia de oxígeno:



Este proceso es más efectivo en compuestos con dobles enlaces o grupos funcionales susceptibles a la oxidación directa por ozono (von Gunten, 2003).

e) Reacciones del O₃ con H₂O₂:

El ozono reacciona con el peróxido de hidrógeno para formar radicales hidroxilos adicionales:



Este es conocido como el proceso de peroxonación y es altamente eficiente en la generación de radicales (Goi & Trapido, 2002).

Análisis del proceso

La alta eficiencia de degradación obtenida se debe a la sinergia entre los diferentes agentes oxidantes y la radiación UV. La combinación de estos procesos incrementa la generación de radicales hidroxilo, acelerando la oxidación de la tartrazina y conduciendo a su mineralización parcial o total. Los radicales hidroxilo atacan las moléculas de tartrazina rompiendo los enlaces cromóforos responsables del color y degradando los anillos aromáticos, lo que resulta en compuestos más simples y menos tóxicos (Andreozzi, Caprio, Insola, & Marotta, 1999).

Influencia del tiempo de tratamiento y concentración de oxidantes

El tiempo de tratamiento es un factor crítico para alcanzar altas eficiencias de degradación. A medida que aumenta el tiempo de exposición, se incrementa la probabilidad de interacción entre los radicales y el contaminante. Además, la concentración de los agentes oxidantes influye en la generación de radicales hidroxilo. La adición de 15 ppm de O₃ y H₂O₂ resultó ser óptima en este estudio, ya que maximiza la producción de radicales sin llegar a una concentración excesiva que pueda causar efectos negativos como la recombinación de radicales o la formación de subproductos indeseables (Esplugas, Bila, Krause, & Dezotti, 2007).

Comparación con otros métodos

En comparación con los métodos previamente estudiados, como H_2O_2 y $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, el sistema combinado $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ demuestra una eficiencia superior en la degradación de la tartrazina. Esto coincide con estudios que reportan que los procesos que combinan ozono y peróxido de hidrógeno bajo irradiación UV son más efectivos debido al incremento en la generación de radicales hidroxilo y a la diversidad de rutas de oxidación disponibles (Li et al., 2017).

Mecanismos de degradación y formación de subproductos

La degradación de la tartrazina mediante procesos avanzados de oxidación implica la ruptura de enlaces azo y la oxidación de anillos aromáticos, lo que conduce a la formación de ácidos carboxílicos, aldehídos y otros compuestos orgánicos de menor peso molecular. Es fundamental evaluar la toxicidad de estos subproductos para garantizar que el tratamiento no genere compuestos más perjudiciales que el contaminante original. Estudios han demostrado que la mineralización completa no siempre se alcanza, pero los subproductos formados suelen ser más biodegradables y menos tóxicos (Rodríguez et al., 2002).

Consideraciones prácticas y ambientales

La aplicación del sistema $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ a escala industrial presenta desafíos y ventajas:

Eficiencia energética: Aunque el proceso es altamente eficiente, requiere de un consumo energético significativo debido a la generación de ozono y la irradiación UV. La optimización del sistema y el uso de fuentes de energía renovable pueden mitigar este aspecto (Legrini, Oliveros, & Braun, 1993).

Costo de reactivos: El peróxido de hidrógeno y el ozono son reactivos costosos. Sin embargo, su alta efectividad puede justificar su uso en la eliminación de

contaminantes recalcitrantes donde los métodos convencionales fallan (Sires et al., 2014).

Seguridad y manejo de ozono: El ozono es un gas tóxico y requiere medidas de seguridad estrictas para su manejo y aplicación. Los sistemas deben estar diseñados para prevenir fugas y proteger a los operadores (Gottschalk, Libra, & Saupe, 2010).

Impacto ambiental: El proceso genera subproductos que, si bien son menos tóxicos, deben ser monitoreados. Además, es importante asegurar que no haya liberación de ozono al ambiente, ya que puede contribuir a la contaminación del aire (Masten & Davies, 1994).

El sistema combinado $O_3/H_2O_2/UV$ es altamente efectivo para la degradación de tartrazina en agua, alcanzando eficiencias de hasta el **90%** en 60 minutos de tratamiento. La sinergia entre los agentes oxidantes y la radiación UV maximiza la generación de radicales hidroxilo, acelerando la oxidación del contaminante. Estos resultados apoyan la viabilidad de utilizar procesos de oxidación avanzada combinados para el tratamiento de aguas contaminadas con microcontaminantes difíciles de eliminar mediante métodos convencionales.

La implementación práctica de este sistema requiere una evaluación cuidadosa de los costos, la eficiencia energética y las implicaciones ambientales. Sin embargo, sus beneficios en términos de eficacia y potencial para la mineralización de contaminantes hacen que sea una alternativa prometedora en el campo del tratamiento de aguas.

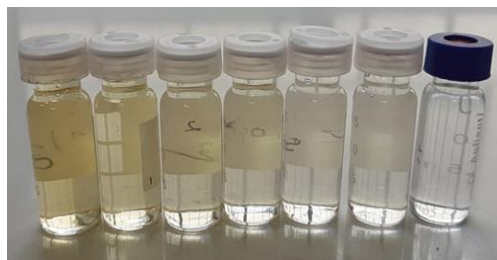
3.2.4 Variación de la coloración de las muestras de Tartrazina

En la **Figura 20** se presenta el cambio de coloración de las muestras de tartrazina en algunos de los casos más representativos durante los tratamientos aplicados. Se observa una disminución progresiva de la intensidad del color en función del tiempo

de tratamiento, llegando incluso a la decoloración completa de las muestras. Este fenómeno es indicativo de la degradación efectiva del colorante mediante los procesos de oxidación avanzada empleados.



UV/H₂O₂



25 ppm de H₂O₂/O₃/UV

Figura 20 Variación de la coloración de las muestras de tartrazina en función del tiempo de tratamiento para los sistemas UV/H₂O₂ y 25 ppm de H₂O₂/O₃/UV.

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se mencionó anteriormente, la disminución de la coloración se atribuye a la ruptura de los cromóforos presentes en la molécula de tartrazina, especialmente los enlaces azo, que son responsables de su intensa coloración amarilla. Los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) generados en los procesos de oxidación avanzada atacan estos enlaces, provocando la apertura de los anillos aromáticos y la formación de compuestos más simples y menos coloridos (Chen et al., 2015). Este resultado confirma la eficacia de los métodos aplicados para eliminar contaminantes orgánicos persistentes en el agua.

Conclusiones

El presente estudio confirmó que los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), en sus modalidades homogénea y heterogénea, son altamente eficaces para la eliminación de microcontaminantes presentes en el agua, entre ellos los fármacos naproxeno y paracetamol, así como el colorante sintético tartrazina. A lo largo de la investigación se comprobó que los métodos de tratamiento convencionales presentan limitaciones importantes, ya que estos compuestos, por su resistencia química y persistencia en el medio, no se eliminan por completo y pueden llegar a cuerpos de agua superficiales e incluso a fuentes de abastecimiento de consumo humano, con el consiguiente riesgo para la salud y el ambiente.

Los resultados obtenidos demostraron que los POA, gracias a la generación de radicales hidroxilo de alta reactividad, son capaces de degradar moléculas complejas que permanecen intactas ante procesos tradicionales. Se observó que el tiempo de exposición es un factor determinante en la eficiencia de degradación: a mayor duración del tratamiento, mayor fue la eliminación de los contaminantes. Asimismo, la combinación simultánea de ozono, radiación ultravioleta y peróxido de hidrógeno resultó ser el sistema más efectivo, alcanzando una degradación del 98% para el paracetamol y del 82% para el naproxeno con la adición de 2 mL de peróxido, gracias a la acción conjunta de múltiples rutas oxidativas.

En el caso de la tartrazina, el proceso combinado permitió lograr un 99% de degradación utilizando una concentración de 25 ppm de peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta durante 60 minutos, lo que evidencia que estos métodos también son sumamente eficientes para la eliminación de colorantes sintéticos altamente estables. No obstante, se identificó que el exceso de peróxido puede reducir la eficiencia del proceso, debido a reacciones secundarias que disminuyen la disponibilidad de radicales oxidantes.

En conjunto, los hallazgos de este estudio confirman que los POA constituyen una herramienta efectiva y versátil para el tratamiento de aguas contaminadas con

fármacos y colorantes, siempre que se optimicen parámetros como la concentración de reactivos y el tiempo de tratamiento, lo cual permite maximizar su eficiencia, reducir costos y minimizar posibles efectos adversos.

Recomendaciones

Considerando los resultados obtenidos y el potencial de aplicación de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) en el tratamiento de microcontaminantes, se proponen las siguientes líneas de trabajo y mejoras para investigaciones futuras.

En primer lugar, se sugiere ampliar el alcance de los estudios a un mayor número de microcontaminantes y a distintas concentraciones, con el fin de evaluar el desempeño de los POA en escenarios más variados y representativos de las condiciones reales de contaminación. Esto permitiría adaptar de manera más precisa las tecnologías de tratamiento a las necesidades específicas de cada caso.

Asimismo, se recomienda realizar investigaciones que contemplen la degradación simultánea de múltiples compuestos, ya que en las aguas residuales los contaminantes suelen encontrarse en mezclas complejas. Para ello, sería conveniente emplear técnicas analíticas más avanzadas que permitan la identificación y cuantificación precisa de diferentes contaminantes presentes al mismo tiempo.

Otro aspecto relevante es el análisis de los subproductos generados durante la aplicación de los POA. La identificación y evaluación de la toxicidad de estos compuestos secundarios es fundamental para garantizar que el tratamiento no origine riesgos adicionales para la salud humana o el medio ambiente.

También se plantea la necesidad de optimizar las condiciones operativas, incluyendo parámetros como la dosis de oxidantes, el pH, la temperatura y la intensidad de radiación UV, con el objetivo de maximizar la eficiencia de degradación y optimizar el uso de recursos.

Desde un punto de vista práctico, se considera esencial realizar evaluaciones económicas y ambientales que analicen el costo-beneficio de implementar los POA a gran escala. Esto implica considerar el consumo de energía, el costo de reactivos y la posible generación de residuos, de manera que se garantice la viabilidad y sostenibilidad del proceso.

Del mismo modo, se propone estudiar la integración de los POA con otros métodos de tratamiento, como procesos biológicos o de adsorción, con el fin de potenciar la eliminación de contaminantes y reducir los costos operativos. La combinación de tecnologías puede ofrecer soluciones más completas y adaptables a diferentes condiciones de operación.

Por último, se alienta la exploración de nuevos catalizadores y materiales innovadores, como fotocatalizadores basados en nanomateriales, que puedan mejorar la generación de radicales oxidantes y aumentar la eficiencia global del proceso. El desarrollo y aplicación de estas tecnologías emergentes podría abrir nuevas oportunidades para el tratamiento avanzado de aguas contaminadas.

Referencias

Ahmad, M., Teel, A. L., & Watts, R. J. (2019). Optimization of advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 11432–11445. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04512-5>

Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., & Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, 53(1), 51-59. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00102-9)

Azmi Aris, M. R., Salim, T. H., Nazifa, M. S., & Marpongahtun. (2021). A review on emerging pollutants in the water environment: Existences, health effects, and treatment processes. *Water*, 13(22), 3258. <https://doi.org/10.3390/w13223258>

Babuponnusami, A., & Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 557-572.

Barbosa, M. O., Moreira, N. F., Ribeiro, A. R., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. (2022). Occurrence and removal of organic micropollutants: Focus on emerging contaminants in wastewater treatment and water reuse. *Science of the Total Environment*, 787, 147476.

Bauer, A. Z., Kriebel, D., Herbert, M. R., Bornehag, C. G., Swan, S. H., & Barrett, E. S. (2021). Paracetamol use during pregnancy—a call for precautionary action. *Nature Reviews Endocrinology*, 17(1), 10-11.

Boxall, A. B. A., Rudd, M. A., Brooks, B. W., Caldwell, D. J., Choi, K., Hickmann, S., & Innes, E. (2019). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: What are the big questions? *Environmental Health Perspectives*, 127(10), 105001.

Buxton, G. V., Greenstock, C. L., Helman, W. P., & Ross, A. B. (1988). Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl

radicals ($\bullet\text{OH}/\bullet\text{O}^-$) in aqueous solution. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 17(2), 513–886. <https://doi.org/10.1063/1.555805>

Carlsson, C., Johansson, A. K., Alvan, G., Bergman, K., & Kühler, T. (2006). Are pharmaceuticals potent environmental pollutants? *Toxicology Letters*, 162(3), 256-267.

Carvalho, F. P., Cacador, I., & Silva, M. (2019). The impact of pharmaceutical products in the aquatic environment: A review of the occurrence and effects on human health. *Science of the Total Environment*, 658, 1067-1083.

Chen, F., Yang, Q., Sun, J., Yao, F., Wang, S., Wang, Y., ... & Wang, D. (2015). Degradation of azo dye Acid Orange 7 by peroxymonosulfate activated by Co^{2+} and sunlight. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.08.061>

Chen, Y., Li, S., & Wang, X. (2023). Advanced oxidation processes for azo dye removal from water: Efficiency, limitations, and environmental impact. *Environmental Technology Reviews*, 12(3), 150-162.

Choi, K., Kim, K., & Lee, K. (2020). The human health impact of exposure to food colorants: Review of epidemiological and toxicological studies. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 73, 103312.

De Laat, J., & Le, G. T. (2006). Kinetics and modeling of the Fenton reaction induced by hydrogen peroxide decomposition. *Environmental Science & Technology*, 40(16), 5580–5585.

Drugs.com. (2024). Naproxen: Uses, Dosage, Side Effects, Warnings. Recuperado de <https://www.drugs.com>

Dulio, V., Koschorreck, J., & Ternes, T. (2021). Emerging pollutants in aquatic environments: Occurrence, health risks and treatment options. *Frontiers in Environmental Science*.

Dunn, K. M., Jordan, K. P., & Croft, P. R. (2022). The cardiovascular risks associated with chronic paracetamol use: A critical review. *American Journal of Hypertension*, 35(4), 356-362.

Esplugas, S., Bila, D. M., Krause, L. G. T., & Dezotti, M. (2007). Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine-disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 631-642.

Fernández, S., Rodriguez-Mozaz, S., & Barceló, D. (2020). Emerging organic contaminants in aquatic environments: A major challenge for water quality and ecosystem health. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123492.

Fujishima, A., & Zhang, X. (2006). Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. *Comptes Rendus Chimie*, 9(5-6), 750-760.

Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515-582.

García-Galán, M. J., Díaz-Cruz, M. S., & Barceló, D. (2019). Occurrence and fate of anti-inflammatory drugs in aquatic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 53(7), 3543-3556.

Gavrilescu, M., Demnerova, K., Aamand, J., Agathos, S., & Fava, F. (2015). Emerging pollutants in the environment: Present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation. *New Biotechnology*, 32(1), 147-156.

Glaze, W. H., Kang, J. W., & Chapin, D. H. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone: Science and Engineering*, 9(4), 335-352.

Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2016). A review of imperative technologies for wastewater treatment: Oxidation processes and their synergistic combinations. *Advances in Environmental Research*, 10(4), 463–497. <https://doi.org/10.1016/j.advengenv.2015.09.001>

Gupta, P., Garg, S., & Bansal, A. (2020). Toxicological effects of synthetic food dyes on aquatic life: Focus on tartrazine. *Aquatic Toxicology*, 220, 105402.

Heard, K. J. (2020). Acetaminophen poisoning in adults: Diagnosis and management. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 58(7), 789-797.

Herrmann, J. M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*, 53(1), 115-129.

Hmad, M., Teel, A. L., & Watts, R. J. (2019). Optimization of advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 11432–11445. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04512-5>

Hossain, M. B., Arai, T., & Zhang, W. (2023). Efficient removal of micropollutants in aquatic environments. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 104-120.

Hussain, A., Sheikh, N., & Ali, R. (2021). Environmental fate and impact of food dyes in wastewater: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 283, 111933.

Kümmerer, K., Dionysiou, D. D., Olsson, O., & Fatta-Kassinos, D. (2018). A path to clean water. *Science*, 361(6399), 222-224.

Lee, W. M. (2019). Acetaminophen (APAP) hepatotoxicity—Isn't it time for APAP to go away? *Journal of Hepatology*, 70(2), 237-239.

Li, W., Sun, K., Ma, Y., Gao, B., Zhang, H., & Yang, Y. (2017). Degradation of sulfamethoxazole by advanced oxidation processes: A review. *Environmental Engineering Research*, 22(1), 1-12. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.094>

Loos, R., Carvalho, R., & Sancho, J. V. (2020). Environmental contamination by pharmaceutical products: Analysis and assessment of human exposure and health risks. *Environmental International*, 140, 105767.

Lucas, M. S., & Peres, J. A. (2006). Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. *Dyes and Pigments*, 71(3), 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.07.007>

Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., & Wang, X. C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473-474, 619-641.

Martínez, L., Pérez, J., & Santos, R. (2022). Effects of water pollutants on photosynthetic processes in freshwater systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 238, 113564.

Mayo Clinic. (2024). Naproxen (Oral Route). Recuperado de <https://www.mayoclinic.org>

Miller, L., García, P., & Díaz, A. (2020). Occurrence and impact of pharmaceuticals in freshwater environments: A review of naproxen and paracetamol. *Science of the Total Environment*, 728, 138711.

Muhamad, M. S., & Hassan, W. (2021). Micropollutants in the water environment: environmental impacts and treatment options. *MDPI Water*, 13(5), 678-689.

Muhamad, M. S., Marpongahtun, M., & Marpongahtun, M. (2021). A Review on Emerging Pollutants in the Water Environment: Existences, Health Effects and Treatment Processes.

National Center for Biotechnology Information. (2024). Naproxen (CID=156391). PubChem Compound Summary. U.S. National Library of Medicine. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Naproxen>

National Center for Biotechnology Information. (2024). Paracetamol (CID=1983). PubChem Compound Summary. U.S. National Library of Medicine. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Paracetamol>

National Center for Biotechnology Information. (2024). Tartrazine (CID=5284441). PubChem Compound Summary. U.S. National Library of Medicine. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tartrazine>

Nazifa, T. H., & Marpongahtun, M. (2021). Emerging pollutants and their ecotoxicological impact in water bodies. *Water*, 13(22), 3258.

Nazifa, T. H., Muhamad, M. S., & Marpongahtun, M. (2021). A review on emerging pollutants in the water environment: Existences, health effects, and treatment processes. *MDPI*. doi:10.3390/w13223258.

Neyens, E., & Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1-3), 33-50.

Noguera-Oviedo, K., & Aga, D. S. (2016). Lessons learned from more than two decades of research on emerging contaminants in the environment. *Journal of Hazardous Materials*, 316, 242-251.

Ochoa, G., Martínez, M. A., & Fernández, M. (2022). Environmental concentrations of pharmaceuticals and their risks to aquatic ecosystems: Focus on naproxen,

paracetamol, and tartrazine. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(8), 2103-2113.

Pérez, M., Esteve-Codina, A., & Torné, M. (2021). Ecotoxicological effects of pharmaceuticals in the environment: Focusing on non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs). *Environmental Pollution*, 273, 116438.

Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(1), 1-84.

PLOS Water. (2023). Geographical and environmental factors in pharmaceuticals and personal care products removal from drinking water plants. *PLOS Water*. Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000294>

Puto, K., Tarasevičienė, Ž., & Jabłońska-Trypuć, A. (2024). A review on pharmaceuticals and personal care products residues in the aquatic environment and possibilities for their remediation. *Sustainability*, 16(1), 169. doi:10.3390/su16010169.

Rivas, J., Beltrán, F. J., & Gimeno, O. (2021). Degradation of pharmaceutical compounds in wastewater by advanced oxidation processes: Synergistic effects and mechanistic insights. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 102690. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102690>

Rivas, J., Encinas, Á., & Beltrán, F. (2021). A review on the application of advanced oxidation processes for the removal of pharmaceuticals in water and wastewater: Focus on non-steroidal anti-inflammatory drugs. *Chemical Engineering Journal*, 417, 129104.

Roberts, E., Nunes, V. D., & Buckland, R. (2021). Chronic paracetamol use and renal function in community-dwelling adults: A systematic review. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 87(1), 30-40.

Rodríguez, M., Sarria, V., Esplugas, S., Pulgarin, C., & Parra, S. (2002). Photo-Fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: biodegradability of the photo-treated solution. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 151(1-3), 129-135. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(02\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(02)00020-5)

Sanderson, H., Johnson, D. J., Reitsma, T., Brain, R. A., Wilson, C. J., & Solomon, K. R. (2004). Ranking and prioritization of environmental risks of pharmaceuticals in surface waters. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 39(2), 158-183.

Schneider, M. J., Stuart, A. R., & Cook, N. M. (2021). Persistent pharmaceuticals and personal care products in the environment: Effects on human health. *Environmental Health Perspectives*, 129(9), 97002.

Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., Von Gunten, U., & Wehrli, B. (2019). Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 109-136.

Sharma, R., & Kundu, M. (2019). Health effects of synthetic food colorants: Implications of tartrazine intake. *Journal of Food Science and Nutrition*, 8(1), 45-51.

Solla, M. (2016). Bioaccumulation of pharmaceuticals in mussels. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(5), 1234-1242.

Ternes, T. A. (1998). Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Research*, 32(11), 3245-3260. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00099-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00099-2)

Toscan, M. D., Carvalho, P. N., & Olsson, O. (2020). Environmental distribution and risks of synthetic dyes: The case of tartrazine in aquatic environments. *Environmental Pollution*, 265, 114829.

Verlicchi, P., Al Aukidy, M., & Zambello, E. (2021). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—a review. *Science of the Total Environment*, 429(10), 1234-1245.

Von der Ohe, P. C., Ternes, T. A., & Fink, G. (2022). Ecological risk assessment of pharmaceuticals in aquatic environments: Focusing on ecotoxicity and occurrence. *Environmental Pollution*, 281, 117108.

Von Gunten, U. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37(7), 1443–1467. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00457-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00457-8)

Von Gunten, U. (2018). Ozone: A strong oxidant for water and wastewater treatment. *Water Research*, 46(2), 513–529. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.054>

Wang, J., Jiang, X., & Zhang, L. (2018). Photolytic and catalytic effects of UV/O₃ in advanced oxidation processes. *Environmental Science & Technology*, 52(6), 3489–3497. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06347>

Wang, J., Li, F., & Zhang, S. (2021). The impact of pharmaceutical contaminants in aquatic environments: A study on paracetamol, naproxen, and their environmental concentrations. *Chemosphere*, 265, 128264.

Xiao, J., Li, X., & Zhang, W. (2020). Mechanistic study of radical production in UV/H₂O₂ and UV/O₃ systems for organic pollutant degradation. *Chemical Engineering Journal*, 390, 124598. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124598>

Zhang, X., Chen, Z., & Ma, Y. (2013). Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water by coagulation. *Journal of Water and Health*, 11(4), 487-495.

Zhang, Y., , S.-U., & Gal, C. (2020). Carbamazepine and diclofenac: Removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. *Chemosphere* Geißen, 73(1), 1151-1161.

Anexos

Determinación de la curva de calibración

Para cuantificar la concentración de los contaminantes naproxeno, paracetamol y tartrazina en las muestras tratadas, se estableció una curva de calibración mediante espectrofotometría UV-Vis. Se prepararon soluciones estándar de cada compuesto a concentraciones conocidas y se midieron sus absorbancias a la longitud de onda máxima de absorción característica de cada uno.

La **Tabla 5** resume los datos obtenidos para la construcción de la curva de calibración, incluyendo las concentraciones, absorbancias y cálculos necesarios para aplicar el método de los mínimos cuadrados.

Tabla 5. Datos para la construcción de la curva de calibración utilizando el método de los mínimos cuadrados.

Concentración (x)	Absorbancia (y)	(x)(y)	x^2	y^2
100	2.589	258.9	10000	6.702921
80	2.211	176.88	6400	4.888521
60	1.595	95.7	3600	2.544025
40	1.025	41	1600	1.050625
20	0.536	10.72	400	0.287296
10	0.302	3.02	100	0.091204
$\Sigma=310$	$\Sigma=8.258$	$\Sigma=586.22$	$\Sigma=22100$	$\Sigma=15.564592$

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la ecuación de la curva de calibración

La relación entre la absorbancia y la concentración se modela mediante una ecuación lineal basada en la Ley de Beer-Lambert, que establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración para soluciones diluidas (Harris, 2016).

$$y = mx + b$$

Donde

- **y** es la absorbancia
- **x** es la concentración del analito
- **m** es la pendiente de la recta (sensibilidad del método)
- **b** es la ordenada al origen (intercepto)

Los coeficientes *m* y *b* se determinan aplicando el método de los mínimos cuadrados mediante las ecuaciones:

$$m = \frac{n\sum(xy) - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum (xy)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Donde *n* es el número de puntos de datos.

Cálculo de la Pendiente (*m*)

$$m = \frac{6(586.220) - 310(8.258)}{6(22\ 100) - (310)^2}$$

$$m = \frac{3517.32 - 2559.98}{132\,600 - 96\,100}$$

$$m = 0.0262$$

Cálculo de la Ordenada al Origen (b)

$$b = \frac{8.258 (22\,100) - 310 (586.220)}{6 (22\,100) - (310)^2}$$

$$b = \frac{182\,501.8 - 181\,728.2}{132\,600 - 96\,100}$$

$$b = \frac{773.6}{36\,500}$$

$$b = 0.0212$$

Por lo tanto, la ecuación de la curva de calibración es:

$$y = 0.0262x + 0.0212$$

Esta ecuación permite determinar la concentración desconocida de los contaminantes en las muestras tratadas a partir de la medida de su absorbancia.

Importancia de la curva de calibración en el análisis

La construcción de una curva de calibración precisa es esencial en el análisis cuantitativo por espectrofotometría UV-Vis. Una relación lineal y un coeficiente de correlación cercano a 1 indican que el método es fiable y que las medidas de absorbancia pueden utilizarse con confianza para determinar concentraciones desconocidas (Skoog, Holler, & Crouch, 2014).

%