

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**OPCIÓN
IX TESIS**

**“GENERACIÓN DE AGENTES QUÍMICOS OXIDANTES PARA LA
DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES RECALCITRANTES EN SOLUCIÓN
ACUOSA”**

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

PRESENTA

GILBERTO DANIEL SILES CALVO

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. BETHSABET JARAMILLO SIERRA
ASESOR DE TESIS:
DR. MARIO IBAÑEZ OLVERA

Dedicatorias

A Dios que fue el que me permitió llegar a este momento, y me dio la valentía para sobre pasar todos los retos que se me presentaron a lo largo de mi tiempo como estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental.

A mis padres María Guadalupe y Gilberto, quienes depositan motivación, consejos para ser mejor persona, me han acompañado a lograr cada uno de los propósitos que puedo tener, su cariño y gran ayuda económica fueron de gran ayuda para culminar este logro de vida.

A mi hermana Dulce, quien me ha brindado su compañía, misma que resulta ser una motivación para lograr diferentes metas de vida.

A mi amiga Deyanira, quien me ha brindado su amistad y compañía, misma que se ha convertido en un soporte sentimental, y de motivación para culminar metas de vida.

A mi amigo Alejandro, quien ha sido una motivación para superarme en mi ámbito profesional.

A mi amiga Milagros, quien me ha brindado su amistad que ha servido de motivación para culminar mis estudios profesionales.

A mi prima Melani, quien me ha brindado su compañía, misma que resulta ser una motivación para lograr diferentes metas de vida

Agradecimientos

A mi grandiosa casa de estudios el Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, en especial a la carrera de Ingeniería Ambiental, por los grandes momentos coleccionados en sus aulas, y por permitirme realizar este proyecto en sus instalaciones.

A mi asesora la Dra. Bethsabet Jaramillo Sierra, quien deposito en mi confianza, su valioso tiempo, consejos, conocimientos, experiencia y su amistad, gracias por ser mi guía en el desarrollo y culminación de este trabajo.

Al Tecnológico Nacional de México por el soporte para el desarrollo de la investigación a través de la convocatoria proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico, e innovación (20409.24_PD).

Resumen

En este estudio, se abordó la importancia del cuidado y preservación del agua, vital para el desarrollo y supervivencia de los seres vivos. Se llevó a cabo el tratamiento del contaminante emergente verde malaquita, procedentes de la industria textil, mediante la aplicación de Métodos de Oxidación Avanzada. Los métodos empleados incluyeron radiación ultravioleta (UV), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ozono (O_3) y combinaciones sinérgicas de algunos de ellos. Se utilizó un reactor de tratamiento con configuración de recirculación, evaluando métodos como UV, H_2O_2 , O_3 , UV/ H_2O_2 , UV/ O_3 y UV/ H_2O_2 / O_3 .

En el reactor, fue ingresada la solución con el contaminante con una concentración inicial de 30 ppm en un volumen de 400 mL, con un tiempo de tratamiento de 60 minutos. La caracterización del líquido residual se llevó a cabo antes, durante y después del tratamiento mediante un espectrómetro UV-Visible, con muestras tomadas cada 10 minutos. Se observó cuantitativamente la variación del color en función del tiempo. Se lograron eficiencias de decoloración de hasta el 85%, 90% y 97%, mediante el uso de O_3 , y 10 ppm de H_2O_2 después de 60 minutos de tratamiento. Se llevo a cabo el diseño y construcción de un reactor de tratamiento para aplicación de este contaminante emergente (verde malaquita) obteniendo resultados favorables.

Palabras clave: ambiente, contaminante emergente, diseño, concentraciín, tratamiento, reactor, oxidación avanzada.

Abstract

In this study, the importance of water care and preservation, vital for the development and survival of living organisms, was addressed. The treatment of the emerging contaminant Malachite Green, originating from the textile industry, was carried out using Advanced Oxidation Methods. The employed methods included ultraviolet radiation (UV), hydrogen peroxide (H_2O_2), ozone (O_3), and synergistic combinations of some of them. A treatment reactor with recirculation configuration was used, evaluating methods such as UV, H_2O_2 , O_3 , UV/ H_2O_2 , UV/ O_3 , and UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$.

In the reactor, the initial concentration of the contaminant was 30 ppm in a volume of 400 mL, with a treatment time of 60 minutes. The characterization of the residual liquid was performed before, during, and after treatment using a UV-Visible spectrometer, with samples taken every 10 minutes. Additionally, the quantitative observation of color variation over time was recorded. Decolorization efficiencies of up to 85%, 90%, and 97% were achieved by using O_3 and 10 ppm of H_2O_2 after 60 minutes of treatment. The design and construction of a treatment reactor for the application of this emerging contaminant (malachite green) was carried out, yielding favorable results.

Keywords: environment, emerging contaminant, design, concentration, treatment, reactor, advanced oxidation.

Contenido	Pág
Resumen	vii
Abstract	viii
Introducción	xii
Componentes de la investigación	1
Justificación	2
Objetivos	4
Objetivos específicos	4
Planteamiento del problema	5
Hipótesis	6
Capítulo 1	7
1.1 Generalidades Agua	9
1.1.1 Composición y estructura molecular	9
1.1.2 Propiedades físicoquímicas	10
1.1.3 Parámetros de calidad del agua	11
1.1.3.1 Parámetros físicos	12
1.1.3.2 Parámetros químicos	13
1.1.3.3 Parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica	18
1.1.3.4 Parámetros bacteriológicos	19
1.1.4 Usos del agua	20
1.1.5 Contaminación del agua	21
1.2 Contaminantes emergentes	24
1.2.1 Azul índigo carmín	27
1.2.1.1 Aplicaciones del Azul Índigo Carmín	27
1.2.1.2 Efectos nocivos para la salud humana	28
1.2.1.3 Efectos negativos en el ambiente	28
1.2.2 Cristal Violeta	30
1.2.2.1 Aplicaciones del Cristal Violeta	30
1.2.2.2 Efectos nocivos para la salud humana	31
1.2.2.3 Efectos negativos en el ambiente	31
1.2.3 Verde Malaquita	32
1.2.3.1 Aplicaciones del Verde malaquita	32
1.2.3.2 Efectos nocivos para la salud humana	32
1.2.3.3 Efectos negativos en el ambiente	33
1.3 Normatividad mexicana en los contaminantes emergentes	34
1.4 Métodos de Oxidación Avanzada	37
Capítulo 2 Metodología	46
2. Descripción general del desarrollo experimental	48
2.1 Diseño y construcción del reactor en cuatro fases	50
2.2 Reactivos utilizados	51
2.3 Selección del método de tratamiento	53
2.3.1 Proceso de decoloración mediante Ozono (O ₃)	53

2.3.2 Proceso de decoloración mediante Radiación Ultravioleta (UV)	53
2.3.3 Proceso de decoloración mediante adición de Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂)	54
2.4 Preparación de la solución sintética	54
2.5 Dispositivos experimentales	54
2.6 Caracterización de la muestra	57
Capítulo 3 Resultados	58
3.1 Descripción global de los hallazgos	60
3.2 Propuesta del reactor de tratamiento	60
3.2.1 Diseño del Reactor de recirculación	60
3.2.2 Aplicaciones preliminares	62
3.3 Decoloración del Verde Malaquita	64
3.3.1 El efecto del O ₃	64
3.3.2 Efecto del UV	66
3.3.3 Efecto O ₃ /H ₂ O ₂	68
3.3.4 Efecto UV/O ₃	70
3.3.5 Efecto UV/O ₃ /H ₂ O ₂	72
Conclusiones	75
Recomendaciones	76
Experiencia profesional adquirida	77
Competencias desarrolladas y/o aplicadas	78
Fuentes de información	79

Índice de Tablas

Tabla		Pág
1	Parámetros físicos del agua (Tejero, 2006)	12
2	Parámetros químicos del agua (Tejero, 2006)	13
3	Parámetros de contaminación orgánica y biológica (Tejero, 2006)	18
4	Concentraciones de color y cantidad de agua generada por diversas industrias (Anjaneyulu et al. 2005)	29
5	Métodos de oxidación avanzada (Rodríguez et al., 2006)	37
6	Potenciales redox de algunos agentes oxidantes	41
7	Ventajas y desventajas de los POA's (Robinson, 2001; Hai, 2007)	41
8	Ventajas y desventajas de las tecnologías para la decoloración de contaminantes textiles (Hai et al., 2007)	44
9	Reactivos empleados	51
10	Estudios efectuados al verde malaquita	53
11	Porcentaje de decoloración del verde malaquita obtenido en los distintos métodos de oxidación avanzada	62
12	Porcentaje de decoloración del verde malaquita obtenido en los distintos métodos de oxidación avanzada	63
13	Parámetros de color y pH obtenidos con el uso de O ₃	65

14	Parámetros de color UPC y pH obtenidos con el uso de UV	67
15	Parámetros de color UPC y pH obtenidos con el método de O_3/H_2O_2	69
16	Parámetros de color UPC y pH obtenidos con el método UV/ O_3	71
17	Parámetros de color UPC y pH obtenidos con el método de UV/ O_3/H_2O_2	73
18	Resultados obtenidos clasificándolos de forma notable o óptima según el método.	74

Índice de Figuras

Figura		Pág
1	Distribución del agua en el mundo	9
2	Estructura molecular del agua	10
3	Polaridad del agua	10
4	Ciclo hidrológico	22
5	Estructura química de la indigotina	27
6	Estructura química del cristal violeta	30
7	Estructura química del verde malaquita	32
8	Diagrama global del desarrollo experimental	49
9	Procedimiento global del dispositivo experimental	50
10	Reactor de tratamiento	56
11	Degradación del verde malaquita por $H_2O_2/UV/O_3$	57
12	Reactor de recirculación propuesto	61
13	Resultados de la degradación de verde malaquita con O_3	64
14	Degradación del verde malaquita con O_3	66
15	Resultados de degradación de verde malaquita con UV	66
16	Eficiencia del UV	67
17	Resultados de la degradación de verde malaquita con O_3/H_2O_2	68
18	Eficacia del método O_3/H_2O_2	69
19	Resultados de la degradación obtenidos por el método de UV/ O_3	70
20	Eficacia del método UV/ O_3	71
20	Degradación obtenida por el método UV/ O_3/H_2O_2	72
21	Decoloración obtenida en la aplicación del UV/ O_3/ H_2O_2	73

Introducción

Los colorantes son parte fundamental en la vida cotidiana, aportan una amplia variedad de tonalidades a alimentos, productos cosméticos, textiles y muchos otros productos que se han vuelto fundamentales en la sociedad. Estos compuestos químicos están diseñados para agregar color a diferentes materiales mediante procesos específicos de aplicación. Si bien es cierto, la sociedad actual ha buscado formas de mejorar y embellecer su entorno, los colorantes químicos han sido una herramienta esencial para lograr la mejora visual de diversos artículos de consumo.

Sin embargo, el uso de colorantes químicos también ha suscitado preocupaciones en torno a la salud y el medio ambiente. Algunos estudios han examinado posibles efectos adversos de ciertos colorantes, la industria ha impuesto regulaciones más estrictas y la búsqueda de alternativas más seguras y sostenibles.

La contaminación del agua con colorantes químicos puede tener consecuencias ambientales y sanitarias. En términos ambientales, la presencia de colorantes puede afectar la vida acuática y la calidad del ecosistema. Algunos colorantes pueden ser tóxicos para los organismos que habitan en el entorno acuático, y los que se encuentran cerca de este, afectando su salud y reproducción. Además, la presencia de colorantes en el agua puede reducir la penetración de la luz solar, afectando la fotosíntesis y la calidad del hábitat acuático.

La degradación de colorantes en cuerpos de agua representa un desafío ambiental significativo, y los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) han emergido como una solución innovadora y efectiva para abordar este problema. Los POA's son métodos especializados que emplean agentes oxidantes fuertes para descomponer compuestos orgánicos persistentes, como los colorantes, en productos más simples y menos nocivos. Este proceso va más allá de los métodos convencionales de tratamiento de aguas, proporcionando una alternativa eficiente y sostenible.

Los colorantes, comúnmente utilizados en diversas industrias, pueden ser difíciles de eliminar completamente mediante procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Los POA's aprovechan la capacidad de los agentes oxidantes, como el ozono, el peróxido de hidrógeno o la radiación ultravioleta, para generar especies reactivas de oxígeno que atacan directamente los enlaces químicos de los colorantes, descomponiéndolos en componentes más simples y menos pigmentados.

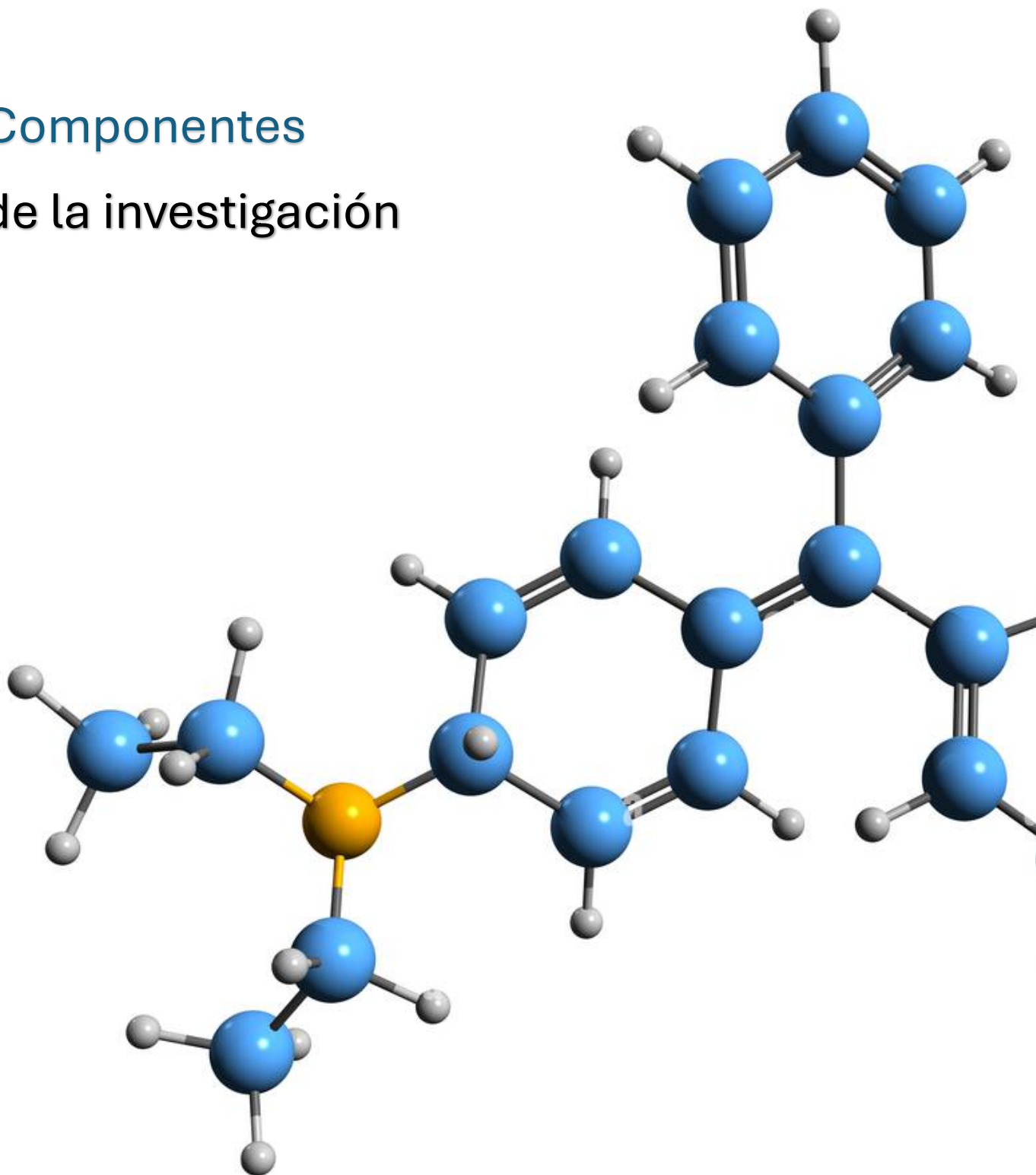
En este proyecto de investigación se llevó a cabo la aplicación de diferentes Procesos de Oxidación Avanzada para la degradación del colorante verde malaquita, analizando distintos parámetros experimentales, como lo son: el tiempo de tratamiento, el pH, el color, y CO_2 .

El trabajo presentado se estructura en tres capítulos. En el primero, se examinan los fundamentos teóricos del agua, se describen las características principales del contaminante analizado y se introducen de manera general los principios de los Métodos de Oxidación Avanzada.

El segundo capítulo se centra en la metodología del desarrollo experimental, dividido en dos secciones: la primera aborda el diseño y construcción del reactor de tratamiento propuesto, y la segunda detalla la metodología empleada en la decoloración del verde malaquita.

Finalmente, en el tercer capítulo se exponen los resultados obtenidos del contaminante emergente en estudio y los hallazgos de la aplicación preliminar del reactor construido. Por último se detallan las conclusiones arrojadas en el objeto de estudio, y se hacen recomendaciones para futuros estudios.

Componentes de la investigación



Justificación

Los contaminantes emergentes en el agua son compuestos químicos que han ganado atención en las últimas décadas debido a su presencia en el medio ambiente y sus posibles impactos en la salud humana y el ecosistema acuático. Estos contaminantes no suelen estar regulados por las normativas ambientales convencionales, lo que aumenta la preocupación sobre sus efectos a largo plazo.

Con el crecimiento de la industria y la tecnología, se han introducido nuevos productos químicos, uno de ellos son los colorantes químicos o artificiales, mismos que son introducidos a los cuerpos de agua mediante descargas, los cuales pueden tener efectos adversos en la vida acuática, alterando los patrones de comportamiento, reproducción y desarrollo de organismos acuáticos. Esto puede afectar la biodiversidad y desequilibrar los ecosistemas acuáticos, con consecuencias notorias en la cadena alimentaria.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden no ser completamente efectivas para eliminar estos contaminantes emergentes debido a sus características químicas únicas. Muchos de estos compuestos son resistentes a los métodos convencionales de tratamiento, lo que resulta en su liberación al medio ambiente a través del agua tratada.

La falta de conciencia pública sobre los contaminantes emergentes puede obstaculizar los esfuerzos para abordar este problema. La educación y la sensibilización son fundamentales para movilizar el apoyo público y fomentar cambios en los comportamientos individuales y colectivos para reducir la introducción de estos contaminantes en el medio ambiente.

Los contaminantes emergentes a menudo presentan estructuras químicas complejas y resistentes a los métodos de tratamiento convencionales. Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) son eficaces para descomponer estas estructuras complejas, facilitando la degradación y eliminación de los contaminantes. Así mismo

involucran la generación de especies reactivas de oxígeno, como radicales hidroxilo, que son altamente oxidantes. Estos radicales tienen la capacidad de atacar una amplia gama de contaminantes emergentes, rompiendo sus enlaces químicos y transformándolos en productos más simples y menos tóxicos.

Diversos autores mencionan que los POA's pueden contribuir al cumplimiento de distintos estándares ambientales, debido a que logran niveles de eliminación de contaminantes emergentes de forma notoria, estos resultados pueden ser difíciles de alcanzar con métodos convencionales.

En resumen, abordar los contaminantes emergentes en el agua es esencial debido a su origen en avances tecnológicos, su resistencia a los métodos de tratamiento convencionales, su impacto a nivel global, las amenazas a la biodiversidad y la salud humana, la influencia del cambio climático y la necesidad de concientización pública. La gestión efectiva de estos contaminantes es crucial para garantizar la sostenibilidad y la calidad a largo plazo de nuestros recursos hídricos.

Objetivos

Degradar el contaminante verde malaquita de giro industrial textil, empleando métodos de oxidación avanzada (O_3 , H_2O_2 , UV y la combinación de estos), para obtener parámetros óptimos en la degradación el colorante en el agua.

Objetivos específicos

- Acondicionar el reactor para llevar a cabo la decoloración.
- Decolorar el Verde malaquita utilizando los métodos antes mencionados.
- Evaluar el grado de efectividad de decoloración del contaminante verde malaquita.
- Analizar de manera cualitativa cómo cambia la coloración de los contaminantes a lo largo del proceso de tratamiento, observando las fases previas, durante y posteriores al tratamiento.

Planteamiento del problema

La contaminación del agua con colorantes químicos plantea riesgos ambientales y de salud. Ambientalmente, la presencia de colorantes puede tener impactos negativos en la vida acuática y la calidad del ecosistema, ya que algunos colorantes son tóxicos para los organismos acuáticos y pueden afectar la salud y reproducción de la fauna cercana. Además, la presencia de colorantes puede obstaculizar la penetración de la luz solar, afectando la fotosíntesis y la calidad del hábitat acuático.

La degradación de colorantes en cuerpos de agua representa un desafío ambiental significativo, y los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) han surgido como una solución innovadora y efectiva para abordar esta problemática. Los POA's son métodos especializados que utilizan agentes oxidantes fuertes para descomponer compuestos orgánicos persistentes, como los colorantes, en productos más simples y menos perjudiciales.

En este estudio, se examinó la importancia de preservar y cuidar el agua, fundamental para el desarrollo y la supervivencia de los seres vivos. Se procedió a tratar el contaminante emergente "Verde malaquita" proveniente de la industria textil mediante la implementación de Métodos de Oxidación Avanzada. Las técnicas utilizadas comprendieron la radiación ultravioleta (UV), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el ozono (O_3) y combinaciones sinérgicas de algunos de estos métodos. Se empleó un reactor de tratamiento con configuración de recirculación, evaluando distintos enfoques como UV, H_2O_2 , O_3 , UV/ H_2O_2 , UV/ O_3 y UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$.

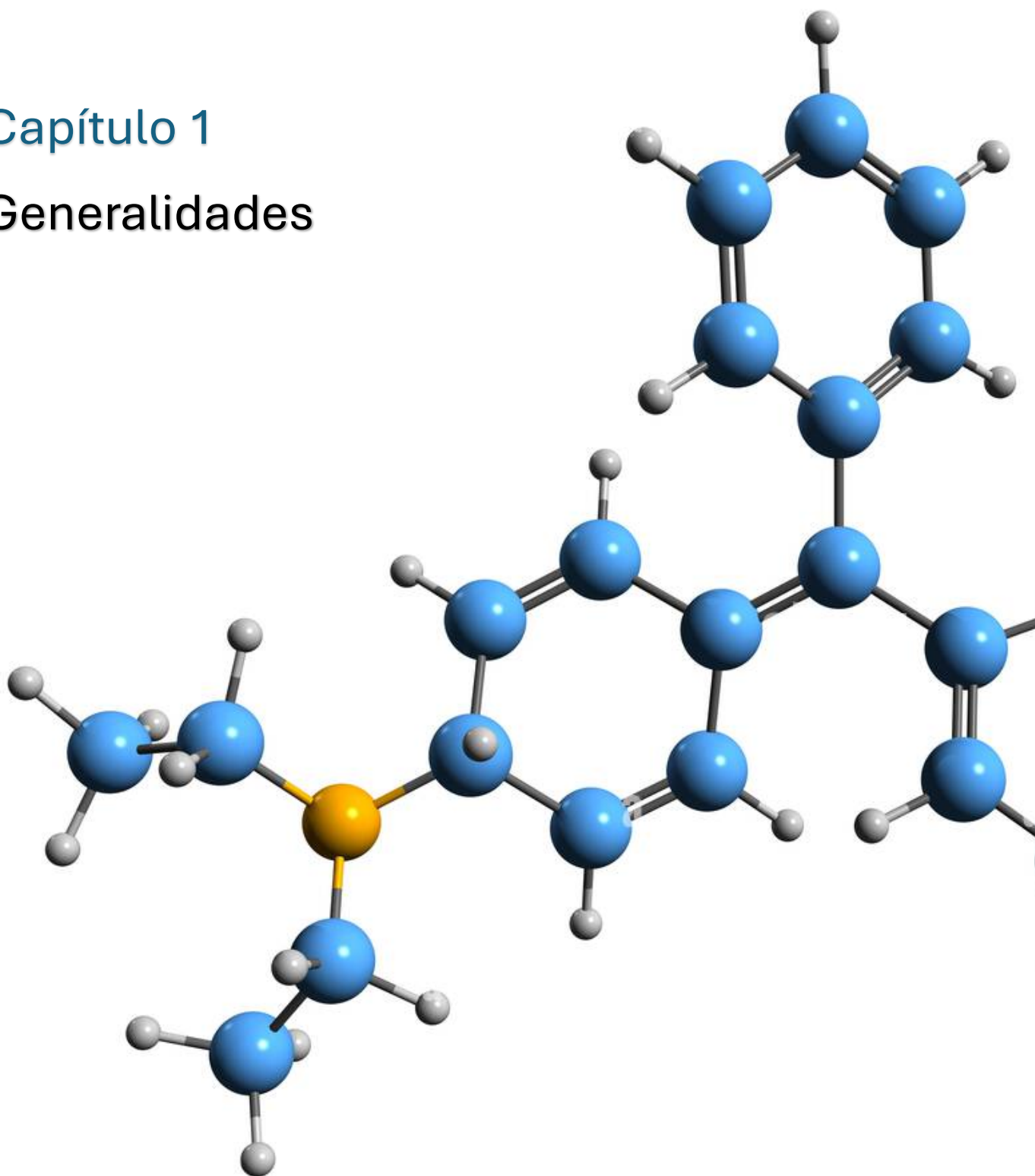
Esta propuesta va más allá de los métodos convencionales de tratamiento de aguas, ofreciendo una alternativa eficiente y sostenible.

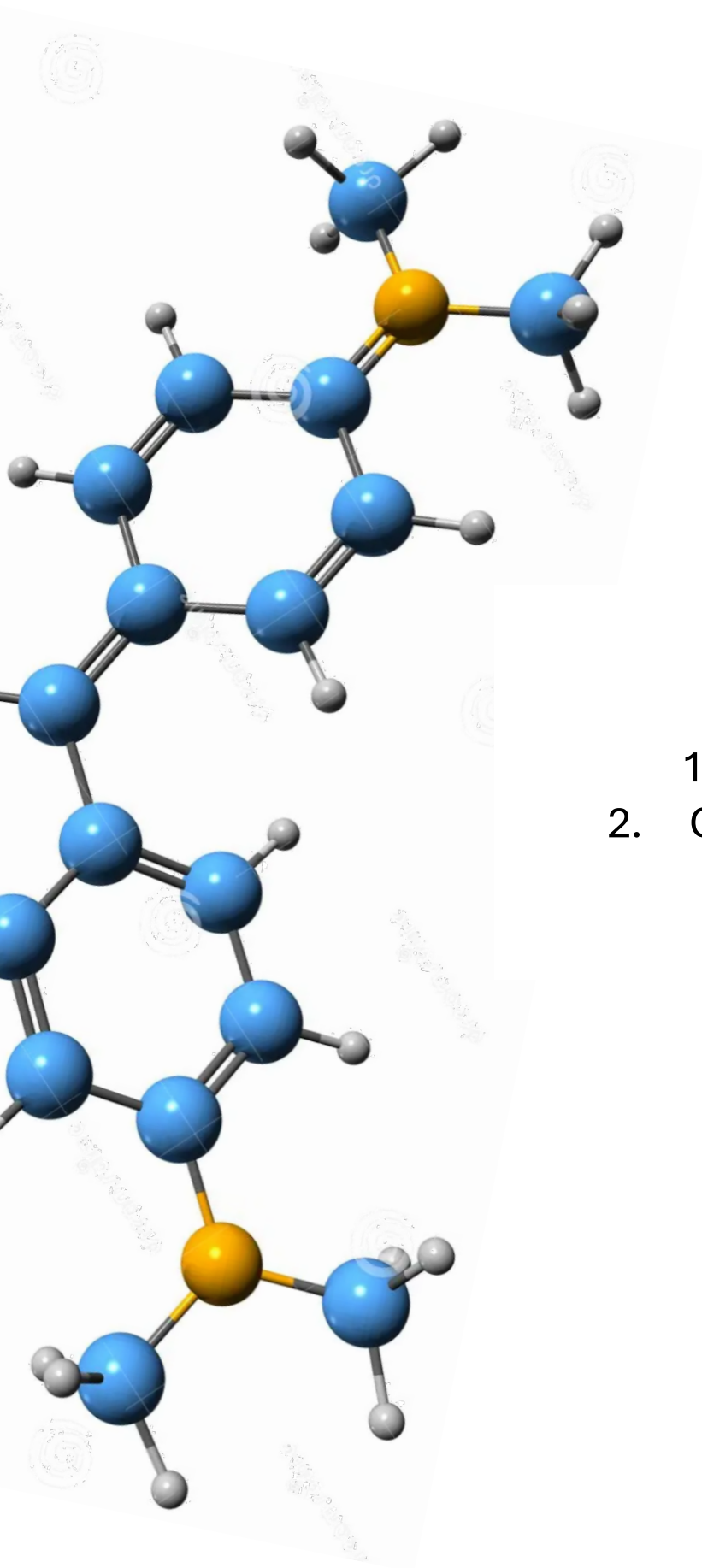
Hipótesis

Los métodos de oxidación avanzada pueden ser aplicados para obtener resultados efectivos para la degradación de contaminantes emergentes, aquellos compuestos aún no ampliamente regulados pero identificados como potencialmente perjudiciales para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Se espera que la capacidad oxidativa de técnicas como el ozono, el peróxido de hidrógeno y la radiación ultravioleta contribuirá significativamente a la transformación y eliminación de estos contaminantes. Al igual que diversos autores se busca demostrar que los métodos de oxidación avanzada son una estrategia prometedora para hacer frente a la problemática de los contaminantes emergentes, contribuyendo así a la mejora de la calidad del agua y la protección del medio ambiente.

Capítulo 1

Generalidades





Contenido general del capitulo

1. Generalidades del Agua.
2. Contaminantes emergentes.
3. Métodos de Oxidación Avanzada.

Capítulo 1.

1. Generalidades.

1.1 Generalidades del Agua.

El agua es un recurso esencial para la vida y desempeña un papel crucial en los ecosistemas y la salud humana. Además es el recurso más abundante sobre la superficie terrestre, es definida como una sustancia líquida, incolora, insípida e inodora cuyas moléculas se componen mediante la unión de un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno (RAE). Su adecuada gestión es esencial para garantizar la sostenibilidad y el bienestar de las comunidades.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se estima que la cantidad total de agua disponible anualmente es de 1,386 billones de hectómetros cúbicos (hm^3). De esta cifra, 35 billones de hm^3 constituyen agua dulce, lo que representa un 2.5% del total. Del agua dulce, el 70% no está disponible debido a su presencia en glaciares, nieve y hielo (Figura 1).

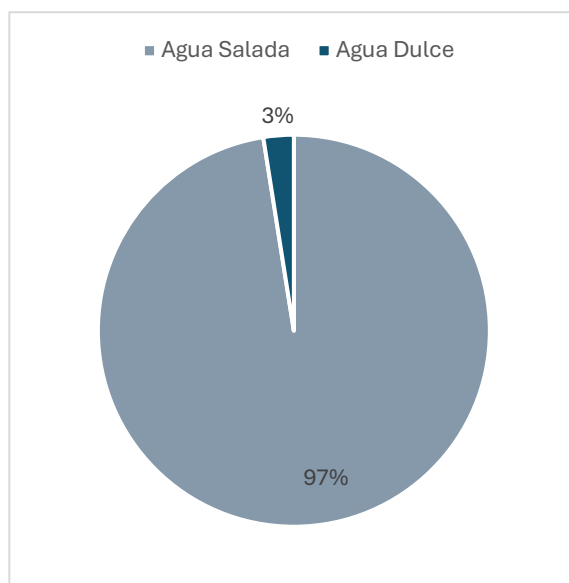


Figura 1 Distribución del agua en el mundo.

1.1.1 Composición y estructura molecular.

La molécula de agua, cuya fórmula química es H_2O , tiene una estructura molecular simple. Está compuesta por dos átomos de hidrógeno (H) y un átomo de oxígeno (O). La disposición de los átomos es angular, formando un ángulo de aproximadamente 104.5 grados entre los dos enlaces H-O. Esta estructura angular se debe a la repulsión entre los pares de electrones no compartidos en el átomo de

oxígeno (Nelson, 2004). La molécula de agua es polar, ya que el oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno, lo que resulta en una distribución desigual de la carga eléctrica y la creación de un dipolo (Figura 2).

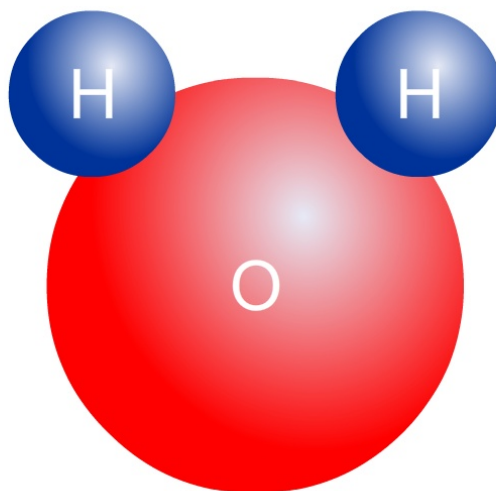


Figura 2 Estructura molecular del agua.

1.1.2 Propiedades fisicoquímicas.

El agua es una sustancia única con diversas propiedades fisicoquímicas que la hacen esencial para la vida y para una variedad de procesos en la Tierra. A continuación se describen algunas de las propiedades fisicoquímicas más destacadas del agua:

Polaridad: El agua es una molécula polar debido a la electronegatividad más alta del oxígeno en comparación con el hidrógeno. De acuerdo con Nelson (2004)³, esta polaridad resulta en la formación de un dipolo eléctrico y en la capacidad del agua para disolver muchas sustancias (Figura 3).

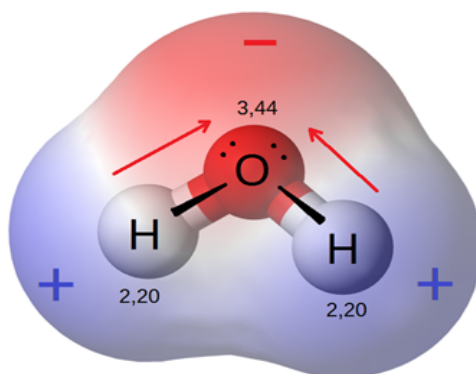


Figura 3 Polaridad del Agua.

Cohesión y Adhesión: Las moléculas de agua tienden a unirse entre sí (cohesión) y a otras superficies (adhesión). Estas propiedades son responsables de fenómenos como la capilaridad y la formación de gotas.

Alta Capacidad Calorífica: El agua tiene una capacidad calorífica específica alta, lo que significa que puede absorber y retener grandes cantidades de calor. Esta propiedad ayuda a moderar las temperaturas en la Tierra y en los organismos vivos.

Alto Calor de Vaporización: El agua requiere una cantidad significativa de energía para cambiar de estado de líquido a vapor. Esto es fundamental en la regulación térmica de los organismos y en muchos procesos naturales (Mc Quarrie, 2006)⁴.

Excelente Solvente: Debido a su polaridad, el agua es un solvente universal y puede disolver una amplia variedad de sustancias, permitiendo reacciones químicas y facilitando procesos biológicos³.

Tensión Superficial: El agua tiene una alta tensión superficial, lo que le permite formar gotas y mantener una superficie que puede soportar objetos pequeños.

Constante Dieléctrica Alta: El agua tiene una constante dieléctrica alta, lo que significa que es un buen aislante eléctrico y juega un papel esencial en las reacciones bioquímicas⁴.

1.1.3 Parámetros de calidad del agua.

La calidad del agua es un factor fundamental para la salud pública, el bienestar social y la sostenibilidad ambiental. En México, la normatividad en torno a la calidad del agua se basa en principios de protección de los recursos hídricos y la salud humana, con el objetivo de garantizar el acceso a agua limpia y segura para todos los usos: consumo humano, actividades industriales, agrícolas, recreativas y ambientales. La legislación mexicana establece una serie de parámetros que deben cumplirse para asegurar que el agua no represente riesgos para la salud o el medio ambiente.

La Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Evalúa diversos parámetros que incluyen características físicas, químicas, indicativos de contaminación orgánica y biológica, y microbiológicas. Estos parámetros son fundamentales para determinar la aptitud del agua para diferentes usos, como el consumo humano, el riego agrícola o la protección de la vida acuática.

1.1.3.1 Parámetros físicos.

Estos parámetros no son índices absolutos de contaminación, sino indicadores relativos, estos valores pueden variar considerablemente donde se pueden apreciar el grado de contaminación y la extensión de la zona afectada. En la tabla 1, se mencionan y describen algunos parámetros físicos:

Tabla 1 Parámetros físicos del agua (Tejero, 2006).

Parámetro	Descripción
Color	El color se refiere a la habilidad de absorber ciertas radiaciones dentro del espectro visible. En condiciones normales, el agua pura tiende a ser casi incolora, aunque en grandes cantidades puede presentar un tono azulado. Aunque el color en sí mismo no indica la idoneidad del agua para el consumo, puede influir en su aceptabilidad estética. En procesos industriales, el color del agua puede afectar el producto final, y en sistemas cerrados, ciertos compuestos colorantes pueden generar espumas.
Conductividad y resistividad	Se refiere a la aptitud del agua para llevar corriente eléctrica, lo cual indica la presencia de sustancias ionizables en el agua. El agua pura, en condiciones normales, tiene una baja capacidad de conducir electricidad; por ende, cualquier medida de conductividad que obtengamos se deberá principalmente a las impurezas presentes en el agua.
Olor y Sabor	Son evaluaciones subjetivas basadas en los sentidos, y no existen dispositivos de detección, registros específicos o unidades de medida para estas observaciones. El agua

adquiere un sabor salado cuando la concentración de Cl^- alcanza los 300 ppm, y un sabor salado y amargo con más de 450 ppm de SO_4^{2-} . La presencia de CO_2 libre en el agua puede impartirle un sabor "picante". Por otro lado, rastros de fenoles u otros compuestos orgánicos pueden generar un olor y sabor desagradables.

Turbidez

Se refiere a la capacidad limitada del agua para permitir el paso de la luz, atribuida a la presencia de materiales insolubles en suspensión, coloidales o de gran finura. Este fenómeno es más prevalente en aguas superficiales y, en términos generales, estos materiales son difíciles de filtrar, lo que puede resultar en la formación de depósitos en las conducciones.

Viscosidad

Se refiere a la "espesura" o resistencia que el agua ofrece al movimiento de sus moléculas entre sí. Un líquido más viscoso tiende a fluir más lentamente que uno menos viscoso cuando se aplica una fuerza.

1.1.3.2 Parámetros Químicos

Los parámetros químicos son fundamentales para evaluar la calidad del agua, ya que posibilitan la identificación y medición de los agentes responsables de la contaminación. Para comprender la causa precisa de la contaminación, es necesario realizar observaciones más minuciosas, y estos parámetros específicos se detallan en la tabla 2:

Tabla 2 Parámetros Químicos del Agua (Tejero, 2006).

<i>Parámetro</i>	<i>Descripción</i>
<i>pH</i>	El pH es una evaluación de la cantidad de iones hidrógeno presentes en una solución, señalando si dicha solución es ácida o alcalina. En aguas naturales, generalmente, el pH oscila entre 6 y 8.

Alcalinidad

La alcalinidad del agua es una medida de su capacidad para resistir cambios en el pH y mantenerse en un rango básico.

La alcalinidad se expresa comúnmente en términos de equivalentes de carbonato de calcio por litro (mg/L de CaCO_3). Algunas de las sustancias que contribuyen a la alcalinidad incluyen bicarbonatos, carbonatos y hidróxidos

Coloides

Son partículas microscópicas que se dispersan en el líquido sin disolverse completamente ni asentarse por completo. Estas partículas coloidales son más grandes que las moléculas individuales, pero aún demasiado pequeñas para ser fácilmente visibles a simple vista. Los coloides pueden incluir una variedad de sustancias, como arcillas, proteínas, materia orgánica y partículas suspendidas.

Acidez Mineral

Se refiere a la presencia de ácidos minerales en una muestra de agua. Los ácidos minerales son compuestos ácidos que contienen elementos metálicos. La acidez mineral puede deberse a la disolución de minerales que liberan iones de hidrógeno (H^+) en el agua, lo que resulta en una disolución ácida.

Sólidos disueltos

Los sólidos disueltos en agua se refieren a las sustancias sólidas que están completamente disueltas en el líquido y no pueden ser filtradas por métodos convencionales. Estos sólidos pueden incluir sales, minerales, gases disueltos y otros compuestos químicos que se encuentran en forma molecular o iónica en el agua.

Sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión en agua son partículas sólidas que están suspendidas y no disueltas en el líquido. A diferencia de los sólidos disueltos, que se encuentran molecular o iónicamente dispersos en el agua, los sólidos

	en suspensión son partículas visibles que pueden variar en tamaño y composición. Estos sólidos pueden incluir sedimentos, arcilla, materia orgánica, partículas suspendidas y otros materiales que están en suspensión en el agua.
Sólidos totales	Compuestos sólidos que están completamente disueltos en el agua y no se pueden filtrar. Esto incluye sales minerales, nutrientes, gases disueltos, entre otros.
Dureza	La dureza del agua es una medida de la concentración de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) presentes en el agua. Estos iones, que son solubles en el agua, provienen principalmente de la disolución de minerales como la calcita (carbonato de calcio) y la dolomita (carbonato de magnesio y calcio).
Sulfatos	El ion sulfato (SO_4^{2-}) se encuentra en sales que tienen una solubilidad que varía de moderada a muy soluble. En aguas dulces, la concentración de sulfatos generalmente oscila entre 2 ppm y 150 ppm, mientras que en el agua de mar alcanza alrededor de 3000 ppm. El agua pura alcanza una saturación de aproximadamente 1500 ppm cuando se trata de sulfatos de calcio. Es importante destacar que la presencia de otras sales de calcio puede aumentar la solubilidad de estos sulfatos.
Cloruros	Se refieren a la presencia de iones cloruro (Cl^-) en la solución acuosa. Estos iones pueden provenir de diversas fuentes, incluyendo la disolución de sales de cloruro, como el cloruro de sodio (sal común), o la contaminación por descargas industriales o actividades humanas.
Fluoruros	Son iones de fluoruro (F^-) disueltos en la solución acuosa. La presencia de fluoruros en el agua puede tener origen natural o ser resultado de actividades humanas.

Bicarbonatos y carbonatos

Son iones derivados del ácido carbónico (H_2CO_3). La presencia de bicarbonatos y carbonatos en el agua está relacionada con la capacidad del agua para neutralizar ácidos y actuar como un sistema amortiguador en la regulación del pH.

Otros compuestos aniónicos

Los sulfuros (S^{2-}) y el ácido sulfhídrico son típicos en ambientes reductores, aunque, en términos generales, las aguas suelen contener menos de 1 ppm de estos compuestos. Una característica distintiva es el fuerte olor desagradable que imparten al agua. Por otro lado, los compuestos fenólicos pueden afectar la idoneidad para el consumo al generar olores y sabores muy desagradables, especialmente después de un proceso de cloración.

Sodio

El sodio es un elemento químico común y su presencia en el agua puede tener diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas.

Potasio

El potasio es un elemento químico esencial para diversos procesos biológicos y se encuentra naturalmente en el suelo y las rocas, lo que puede influir en la composición química del agua.

Hierro

Es un catión de considerable relevancia en términos de contaminación y se presenta en dos estados: como ión ferroso (Fe^{2+}) o en una forma más oxidada conocida como ión férrico (Fe^{3+}). La estabilidad y predominancia entre estas dos formas están condicionadas por factores como el pH, condiciones oxidantes o reductoras, la composición de la solución, entre otros. Este elemento tiene implicaciones en la potabilidad del agua y representa un inconveniente en procesos industriales debido a su propensión a generar incrustaciones.

Magnesio

El ion manganeso exhibe similitudes en su comportamiento con el ion hierro en la mayoría de los casos. Aparte de su capacidad para tener una valencia positiva bivalente y trivalente, el manganeso puede presentarse con una valencia de +4, formando el MnO_2 , que es un compuesto insoluble. La presencia de manganeso en el agua es poco común y generalmente no supera la 1 ppm, siendo más propenso a ocurrir en condiciones de pH ácido.

Calcio

El catión calcio (Ca^{2+}) tiende a formar sales que son generalmente poco solubles, algunas de ellas con solubilidad moderada, pero la mayoría son altamente insolubles. Este catión es el componente principal que contribuye a la dureza del agua y es responsable de la formación de incrustaciones.

Metales tóxicos

Los elementos más frecuentes son el Arsénico, el Cadmio, el Plomo, el Cromo, el Bario y el Selenio. Se debe realizar un control riguroso en la fuente de la contaminación para estos elementos.

Gases disueltos

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas con solubilidad considerable que experimenta hidrólisis, generando iones bicarbonato y carbonato según el pH del agua. Mientras que las aguas subterráneas de mayor profundidad pueden contener hasta 1500 ppm, las superficiales generalmente se encuentran en el rango de 1 a 30 ppm. Un exceso de dióxido de carbono puede llevar a que el agua se vuelva corrosiva.

1.1.3.3 Parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica

Los indicadores biológicos ofrecen una opción frente a las restricciones de los parámetros fisicoquímicos al emplear organismos vivos para evaluar la calidad del agua. Algunos de estos parámetros se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3 Parámetros de contaminación orgánica y biológica (Tejero, 2006).

<i>Parámetro</i>	<i>Descripción</i>
La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Es una medida que evalúa la cantidad de oxígeno necesario para que los microorganismos descompongan la materia orgánica presente en una muestra de agua. Se utiliza como indicador de la contaminación orgánica y del nivel de actividad microbiana en el agua. La DBO se expresa comúnmente en miligramos de oxígeno por litro (mg/L) de agua.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Es la evaluación de la cantidad total de oxígeno requerida para oxidar compuestos químicos en una muestra de agua. A diferencia de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), que se basa en la actividad microbiana, la DQO utiliza reactivos químicos fuertes para oxidar la materia orgánica y algunos compuestos inorgánicos presentes en el agua.
Carbono Organico Total (COT)	Es una medida que evalúa la cantidad total de carbono en una muestra de agua, que proviene de compuestos orgánicos. A diferencia de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos, el COT se centra específicamente en la fracción orgánica del carbono. El análisis de COT se realiza mediante técnicas que oxidan y cuantifican la cantidad total de carbono orgánico presente en la muestra. La medición se expresa

comúnmente en miligramos de carbono por litro (mg C/L) o partes por millón (ppm) de agua.

1.1.3.4 Parámetros bacteriológicos

Los parámetros bacteriológicos son indicadores que se utilizan para evaluar la calidad microbiológica del agua. Estos parámetros ayudan a determinar la presencia de microorganismos, especialmente bacterias, que pueden indicar la contaminación del agua y representar un riesgo para la salud humana (Root, 2014). Algunos de los parámetros bacteriológicos comunes incluyen:

Coliformes Totales: Los coliformes son bacterias que se encuentran en el intestino de animales de sangre caliente, incluyendo humanos. La presencia de coliformes totales en el agua sugiere posible contaminación fecal.

Coliformes Fecales: Este subconjunto de coliformes es específico de los intestinos humanos y de otros animales de sangre caliente. Su presencia indica contaminación fecal y puede ser un indicador de mayor riesgo para la salud.

***Escherichia coli (E. coli)*:** *E. coli* es una bacteria coliforme que se encuentra en los intestinos de animales de sangre caliente, incluyendo humanos. La detección de *E. coli* en el agua indica contaminación fecal reciente y es un indicador de posible presencia de patógenos.

***Enterococos*:** Estos microorganismos también se encuentran en los intestinos y son utilizados como indicadores de contaminación fecal (Rodriguez, 2008).

La presencia de microorganismos no tiene importancia en muchos procesos industriales pero la industria alimentaria requiere agua de calidad potable.

Demanda de Cloro: Corresponde a una medida del contenido de materia orgánica de un agua, obtenido al añadir cloro. Inicialmente se forman compuestos de cloro con la materia orgánica, pero que se van destruyendo al aumentar la adición. El breakpoint, o punto de ruptura, corresponde al inicio de la destrucción de los compuestos clorados originalmente formados. No tiene interés en la caracterización de aguas subterráneas, pero sí para las aguas superficiales. Es importante en el

tratamiento de aguas potables para determinar la cantidad de desinfectante a añadir. Se mide en ppm de Cl_2 (Larrea, 2012).

1.1.4 Usos del agua.

De acuerdo con el Instituto Internacional de Gestión del Agua (International Water Management Institute, 2000)⁹ el agua es un recurso esencial que se utiliza en una amplia variedad de contextos y sectores. Algunos de los usos más comunes del agua incluyen:

Consumo Humano: El agua es esencial para la hidratación humana. Además de beber, se utiliza en la preparación de alimentos y la higiene personal.

Agricultura: El riego es crucial para el crecimiento de cultivos. El agua también se utiliza en la producción de alimentos y en la crianza de animales.

Industria: En la fabricación y procesamiento de productos, el agua se utiliza para enfriar maquinaria, limpiar equipos y como componente en numerosos procesos químicos.

Energía: La generación de energía a menudo requiere grandes cantidades de agua, ya sea para la producción de electricidad en plantas hidroeléctricas o para enfriar instalaciones de energía térmica.

Limpieza y Saneamiento: El agua es esencial para la limpieza doméstica e industrial, así como para el tratamiento de aguas residuales para mantener un ambiente saludable.

Transporte: Se utiliza agua para la navegación y transporte de mercancías en ríos y océanos.

Recreación y Turismo: Lagos, ríos y playas proporcionan lugares para actividades recreativas y turísticas, como natación, pesca y deportes acuáticos.

Higiene en la Salud: El agua es fundamental en entornos médicos y de salud para la limpieza de equipos, la higiene personal y los procedimientos médicos.

Investigación Científica: En laboratorios de investigación, el agua es utilizada como disolvente y reactante en una variedad de experimentos y análisis.

Hábitat Natural: Los ecosistemas acuáticos proporcionan hábitats para numerosas especies de plantas y animales, contribuyendo a la biodiversidad.

Extinción de Incendios: El agua es un componente clave en la lucha contra incendios, utilizada tanto en sistemas de rociadores como en equipos de extinción de incendios.

1.1.5 Contaminación del agua

La contaminación de los recursos hídricos, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se define como cualquier alteración física, química o biológica que dé como resultado una disminución de la calidad del agua provocando efectos adversos en los organismos vivos, o impidiendo su posterior uso.

La contaminación del agua se caracteriza por la introducción, realizada por seres humanos, de elementos abióticos o bióticos en entornos acuáticos como mares, ríos y lagos. Estos elementos pueden generar efectos perjudiciales o tóxicos, afectar los recursos biológicos, representar riesgos para la salud humana, obstaculizar actividades marítimas, incluida la pesca, y disminuir los aspectos estéticos y recreativos de dichos entornos (Arrazcaeta, 2002)¹⁰.

Las principales vías de introducción de contaminantes en el entorno acuático son las aguas residuales, que abarcan tanto las urbanas como las industriales, así como aquellas de origen agrícola o ganadero. La predominancia de una u otra depende en gran medida del tipo específico de contaminación y del grado de tratamiento o mitigación natural (si es que existe) al que están sujetas (Barceló, 2008)¹¹.

La presencia de sustancias "indeseables" y tóxicas, así como las fluctuaciones en las concentraciones de los componentes habituales, se origina en lo que se conoce como el "ciclo hidrológico" (figura 4).

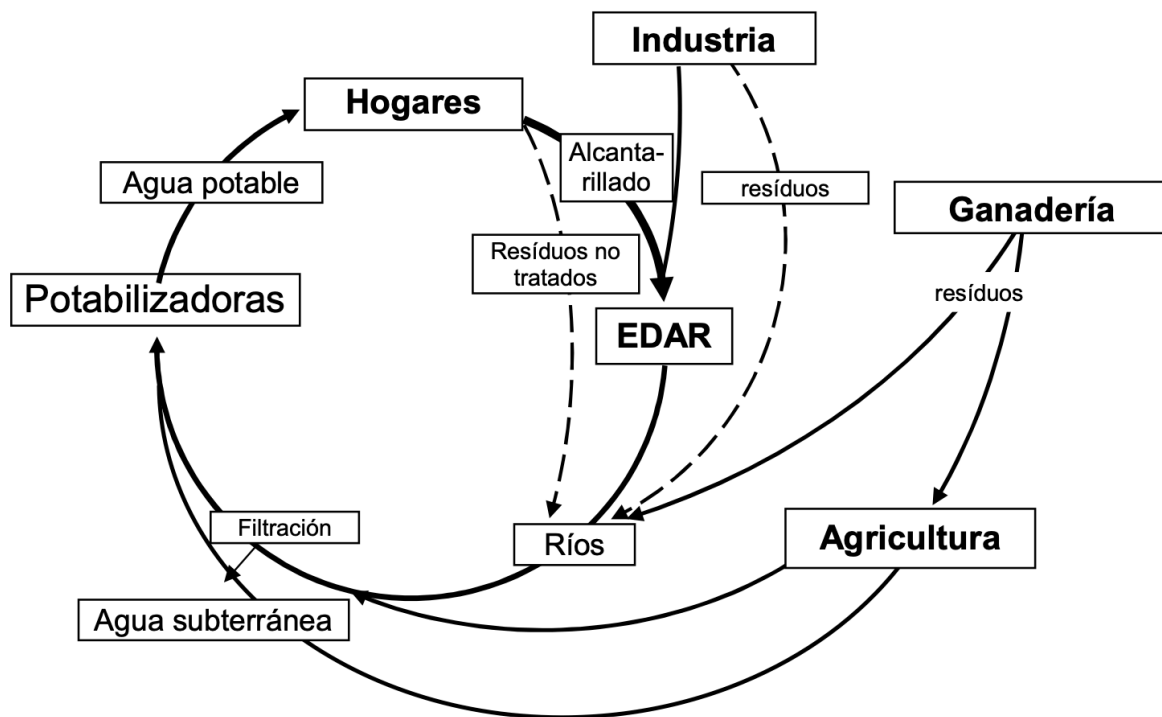


Figura 4 Ciclo hidrológico

Las fuentes que generan contaminación incluyen aspectos naturales, térmicos, municipales e industriales. Estas fuentes generan diversos contaminantes que contribuyen a la contaminación del agua, abarcando contaminantes físicos como sólidos disueltos y materiales en suspensión, contaminantes químicos tanto orgánicos como inorgánicos (que incluyen nutrientes, detergentes y metales como cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc), contaminantes biológicos como bacterias, protistas, helmintos y virus, así como contaminantes orgánicos que comprenden colorantes, fármacos, edulcorantes, entre otros.

Las industrias, como las textiles, médicas y alimenticias, representan una causa significativa de contaminación del agua. Esto se debe a que, en el proceso de producción, utilizan agua y la descargan sin tratamiento previo en fuentes naturales, contribuyendo así a la contaminación. Este vertido desencadena un aporte considerable de color, afectando la función fotosintética de las plantas y propiciando la eutrofización.

En la actualidad, México enfrenta serios desafíos relacionados con la disponibilidad, el desperdicio y la contaminación del agua. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), las áreas más densamente pobladas del país son también las que sufren más por la escasez y contaminación de los recursos hídricos. Esta situación repercute en la calidad del agua, volviéndola inadecuada para diversos usos, incluyendo el consumo humano.

Entre las fuentes que presentan un nivel significativo de contaminación se encuentran la Península de Baja California y la cuenca Lerma-Santiago-Pacífico. Las áreas de las regiones del Balsas en Michoacán y parte de Guerrero, a pesar de contar con agua subterránea, enfrentan desafíos como una baja cobertura de agua potable, alta contaminación en las fuentes superficiales y daños derivados de fenómenos hidrometeorológicos intensos. Mientras tanto, en la cuenca del Golfo Centro, el principal problema es la contaminación del agua, y en la del Valle de México se registra contaminación tanto en fuentes superficiales como profundas (Decré, 2000).

Además, la contaminación representa uno de los desafíos fundamentales para los acuíferos en México. Aunque las aguas subterráneas suelen ser menos propensas a la contaminación que las superficiales, cuando esta ocurre, resulta más costosa y complicada de eliminar. Esto se debe al lento ritmo de renovación de las aguas subterráneas, estimándose en cientos de años, en contraste con los días que el agua permanece en los ríos. Este aspecto dificulta significativamente el proceso de saneamiento. La problemática se agrava en muchas ocasiones debido al reconocimiento tardío del deterioro del acuífero, ya que la naturaleza invisible del agua subterránea hace que el problema tarde en manifestarse (Pignatello, 2006).

1.2 Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes abarcan compuestos de diversas fuentes y naturalezas químicas, cuya presencia en el medio ambiente inicialmente se considera insignificante en términos de distribución y concentración, pasando desapercibidos. No obstante, actualmente, se están detectando ampliamente y poseen el potencial de causar impacto ecológico y efectos adversos para la salud (Barceló, 2007; Stuart, 2012). Estos contaminantes comparten la característica de no requerir una presencia constante en el entorno para provocar efectos negativos, ya que su continua introducción compensa sus elevadas tasas de transformación o eliminación (Barceló, 2007).

Se ha establecido que estos compuestos ingresan al ambiente a través de diversas fuentes y vías, como las aguas residuales domésticas e industriales (Daughton, 2004; Fent, 2006), los residuos de plantas de tratamiento (Kümmerer, 2001), los efluentes hospitalarios (Kümmerer, 2001), las actividades agrícolas y ganaderas (Watanabe, 2010) y los tanques sépticos (Swartz, 2006). Estos contienen una variedad de componentes orgánicos específicos, ya que los contaminantes emergentes se presentan en aguas superficiales a concentraciones que aún no han sido específicamente definidas en términos de criterios de calidad ambiental (Kastelan, 2007; Eggen, 2010). Además, las plantas de tratamiento convencionales de aguas residuales no están diseñadas para eliminarlos, lo cual genera inquietud tanto en la comunidad científica como en las entidades ambientales reguladoras (Kastelan, 2007; Eggen, 2010).

Entre las diversas clasificaciones de contaminantes emergentes, destacan los siguientes:

- Pesticidas o plaguicidas

Son sustancias diseñadas para prevenir, destruir, repeler o mitigar plagas. A pesar de la regulación que los ha sometido a lo largo de las décadas, la atención se centra

en los metabolitos, productos de degradación que pueden resultar más tóxicos que los compuestos originales (Geerdink, 2002; Sinclair, 2003).

- Productos farmacéuticos

Estas son sustancias químicas purificadas utilizadas en el tratamiento, cura, prevención o diagnóstico de enfermedades o malestares. Su disposición en el medio acuático se ha vuelto una preocupación, especialmente por la excreción humana, eliminación de productos no utilizados y uso en ganadería (Richardson, 1985). Una amplia variedad de productos farmacéuticos se ha identificado en aguas superficiales y subterráneas, vinculada a la eliminación de aguas residuales (Barnes, 2008; Miller, 2006; Pérez, 2007).

En función de las propiedades fisicoquímicas de los fármacos, sus metabolitos y productos de degradación, así como las características del suelo, estas sustancias pueden llegar a las aguas subterráneas, contaminar acuíferos o retenerse en el suelo, acumulándose y afectando el ecosistema y a los seres humanos a través de la cadena trófica (Barceló, 2007).

- Compuestos

La cafeína, la nicotina, y el metabolito de la nicotina han sido ampliamente detectados en el agua subterránea impactada por aguas residuales. Algunos autores encontraron altas concentraciones de los edulcorantes artificiales de acesulfamo de potasio, sacarina, ciclamato y sucralosa en las aguas subterráneas afectadas por estanques de infiltración de aguas residuales (Godfrey et al, 2007; Seiler et al., 1999; Teijón et al., 2010; Van Stempvoort et al., 2011), además de que también mostraron acesulfamo de potasio a ser ampliamente detectado en el medioambiente debido a su uso, la movilidad y la persistencia (Buerge et al., 2009).

- Productos para el tratamiento de aguas

Los procesos químicos de desinfección en el tratamiento para agua potable conducen a la formación de subproductos de desinfección que son indeseables,

debido al potencial de toxicidad crónica (Who, 1990). Por lo general, son el resultado de la oxidación de componentes de la mezcla en el agua. Existe un debate sobre la importancia de la desinfección por productos en comparación con el riesgo de enfermedades transmitidas después del tratamiento (Ames, 1987), ya que, aunque la desinfección reduce el riesgo de infección patógena, puede representar una amenaza para la salud humana, debido a los residuos de desinfectantes y sus subproductos (Colman, 2011; Sadio, 2004).

- Productos de cuidado personal

Los productos de cuidado personal son producidos para uso directo sobre el cuerpo humano. En general estos productos están dirigidos a alterar el olor, el aspecto, el tacto, y no deben mostrar actividad bioquímica significativa. Muchos de estos productos son usados como ingredientes activos o preservativos en cosméticos, productos de baño o fragancias. En ocasiones estas sustancias son usadas en cantidades mayores a las recomendadas (Daughton, 1999).

- Colorantes

Hay una amplia gama de compuestos industriales que pueden ser liberados al medio ambiente. Muchos de estos causan problemas en la salud, tales como los disolventes clorados, hidrocarburos de petróleo, incluidos los hidrocarburos poliaromáticos y el combustible oxigenado de éter de metilo butilo terciario, y los plastificantes / bisfenoles resinas, adipatos y ftalatos (Garrett, 1996; Moran, 2006; Verliefde, 2007). La mayoría de estos compuestos industriales se clasifican como contaminantes prioritarios y algunos productos de degradación son considerados como contaminantes emergentes. Además, de ser los colorantes un peligro inminente en la descarga de este tipo de aguas, ya que ninguna normatividad mexicana y/o internacional regula la descarga de color, ya que este inhibe la función fotosintética de las plantas y siendo el primer peligro por el gran potencial toxicológico que posee.

1.2.1 Azul índigo carmín

El azul índigo carmín, también conocido como indigotina, es un colorante sintético de color azul que se utiliza en diversas industrias, especialmente en la textil (figura 5). Este colorante también tiene aplicaciones en la industria alimentaria y se codifica como E 132, donde se emplea como un pigmento alimenticio.

Antes de la síntesis industrial, el índigo, del cual se obtiene la indigotina, se extraía de diversas plantas, como la *Indigofera tinctoria*, y en algunas especies de animales. Sin embargo, con los avances en la química y la síntesis de colorantes, la producción de indigotina se ha vuelto predominantemente sintética.

El proceso de síntesis del azul índigo carmín ha permitido una producción más eficiente y controlada del colorante, garantizando su disponibilidad en diferentes sectores industriales. Además de su uso en la industria textil, donde se emplea para teñir telas y prendas, la indigotina también se utiliza en la industria alimentaria para proporcionar un color azul a ciertos productos.

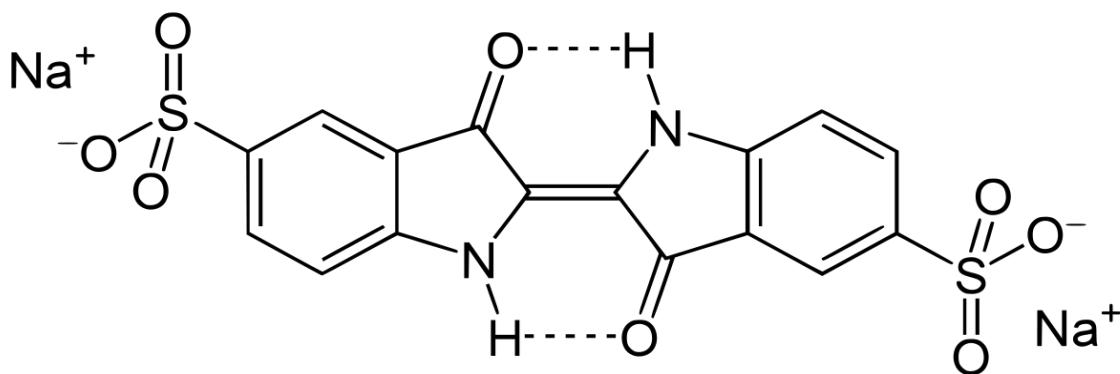


Figura 5 Estructura química de la indigotina

1.2.1.1 Aplicaciones del Azul Índigo Carmín

Los colorantes desempeñan un papel crucial en una amplia variedad de aplicaciones debido a la diversidad de productos generados diariamente. Algunos usos notables del colorante azul índigo carmín incluyen (Quintero, 2008):

- Confitería
- Indicador de pH

- Detector de ozono, nitritos y cloritos
- Detector de fugas de líquido amniótico
- Tinta de impresoras
- Teñido de pantalones de mezclilla
- Medicamentos

1.2.1.2 Efectos nocivos para la salud humana

El contacto directo o indirecto con este contaminante puede tener diversos efectos nocivos para la salud humana, siendo los principales:

- Irritación de los ojos y piel
- Daño al feto en mujeres embarazadas
- Intoxicación
- Cáncer en la piel
- Irritación gastrointestinal
- Hiperactividad
- Problemas respiratorios
- Reacciones cutáneas

1.2.1.3 Efectos negativos en el ambiente

Más de 10,000 pigmentos y colorantes xenobióticos son utilizados en diversas industrias, como la textil, papelera, cosmética y farmacéutica, entre otras. En muchos de los procesos llevados a cabo por estas industrias, se liberan cantidades significativas de efluentes contaminados con colorantes al medio ambiente, según se detalla en la Tabla 4. Es importante destacar que la industria textil se identifica como la principal fuente emisora de estos contaminantes, según investigaciones realizadas por Anjaneyulu (et al. 2005) y Días (et al. 2007). La composición del agua residual resultante dependerá de las sustancias químicas empleadas durante el proceso.

Los efluentes generados por la industria textil se caracterizan por presentar fluctuaciones notables en parámetros como la DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), color, salinidad y pH. Los valores característicos de estos parámetros, según el estudio de Bae et al. (2005), son:

- Color visible (1100-4500)
- DQO (800-1600 mg/L)
- pH alcalino (9-11)
- ST (Sólidos Totales) (6000-7000 mg/L)

Tabla 4 Concentraciones de color y cantidad de agua generada por diversas industrias (Anjaneyulu et al. 2005).

Industria	Cantidad de agua generada (m^3/Ton)	Concentración de color (Hazen)
Azucarera	0.4 caña triturada	150-200
Cervecería	0.25 cerveza producida	200-300
Destilería	12 alcohol producido	200-300
Curtido	28 piel	400-500
Pulpa y papel	175 papel	100-600
Textil	120 fibra	1100-1300

La toxicidad en el medio acuático puede atribuirse a diversas sustancias, entre las cuales se incluyen sales como el NaCl y Na₂SO₄, agentes surfactantes como fenoles, metales pesados que forman parte de los colorantes, compuestos orgánicos como solventes clorados, biosidas como el Pentaclorofenol y aniones tóxicos como el sulfuro, según investigaciones realizadas por Bae et al. (2005).

Durante el proceso de teñido, se produce una cantidad considerable de efluentes que contienen colorantes, ya que aproximadamente el 30% de estos compuestos se pierden debido a las deficiencias inherentes al proceso de teñido y son liberados en los efluentes. La utilización de diversos colorantes químicos conduce, en lapsos cortos, a la generación de efluentes con una composición extremadamente diversa, lo que demanda un tratamiento de agua de gran complejidad.

1.2.2 Cristal Violeta

El cristal violeta (figura 6) es un colorante orgánico de naturaleza sintética y alcalina perteneciente a la categoría de *triaminotrifenilmetano*. Se presenta en forma de polvo con un brillo metálico y un tono verde oscuro. Este colorante tiene aplicaciones principalmente en el ámbito médico. Entre los nombres alternativos que recibe se encuentran violeta de metilo, *cloruro de hexametilpararosanilina*, violeta de anilina, violeta de genciana, entre otros.

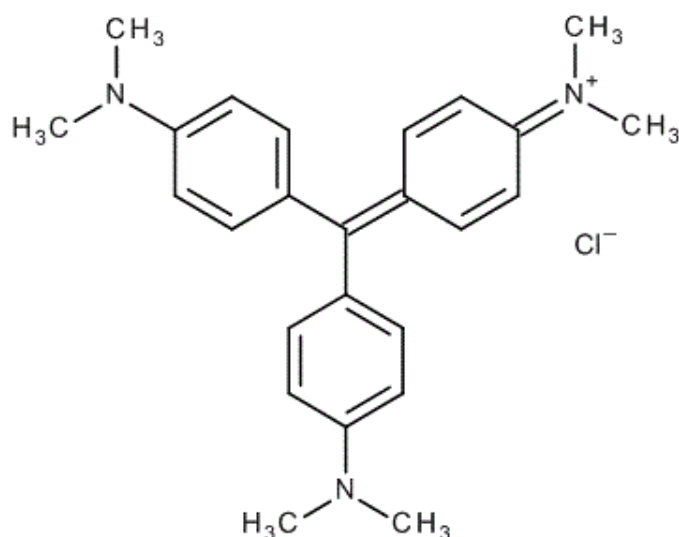


Figura 6 Estructura química del cristal violeta

1.2.2.1 Aplicaciones del Cristal Violeta

El cristal violeta, según lo indicado por Riaños en 2018, se utiliza en una variedad de aplicaciones que incluyen:

- Agente antiséptico y antifúngico.
- Indicador básico.
- Aditivo alimentario.
- Medicamento veterinario.
- Agente dermatológico.
- Tinta para impresoras.
- Tinción Gram.
- Teñido de Materiales

Al ser empleado en la técnica de tinción de Gram, el cristal violeta se destaca como uno de los agentes identificadores más significativos de bacterias en la actualidad. Además, se utiliza en entornos hospitalarios para tratar quemaduras severas y otras lesiones en la piel y las encías.

1.2.2.2 Efectos nocivos para la salud humana

El cristal violeta es un colorante que tiene diversos efectos nocivos a la salud los principales son los siguientes (Riaños, 2018):

- Lesiones oculares
- Intoxicación
- Cáncer en la piel
- Trastornos

1.2.2.3 Efectos negativos en el ambiente

El cristal violeta contiene en su estructura un grupo trifenilmetano que presenta riesgos por inhalación, ingestión y contacto con la piel. Se estima que se fabrican más de 100,000 tintes, generando anualmente más de 0.7 millones de toneladas, y aproximadamente entre el 10% y el 20% de los colorantes de triarilmetano se liberan al medio ambiente, principalmente mediante la descarga en aguas superficiales. Esto conlleva a serios problemas ambientales y riesgos para la salud debido a la elevada toxicidad de estos compuestos, según Riaños en (2018).

Cuando estos colorantes son vertidos en aguas residuales, pueden ocasionar efectos perjudiciales en la vida acuática, ya que interactúan fácilmente con las superficies celulares de carga negativa, ingresando a las células y concentrándose en el citoplasma.

1.2.3 Verde Malaquita

El verde malaquita (figura 7) pertenece a la familia de colorantes triarilmetano. Su composición química específica varía, pero suele contener grupos de arilo y metilo en su estructura.

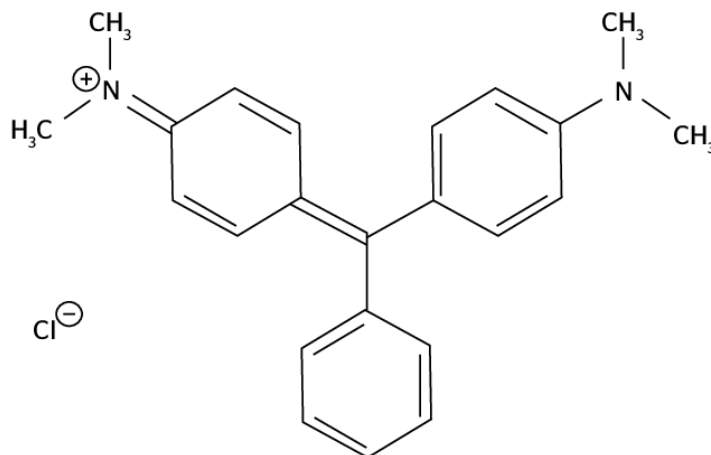


Figura 7 Estructura química del verde malaquita

1.2.3.1 Aplicaciones del Verde malaquita

El verde malaquita ha encontrado diversas aplicaciones a lo largo del tiempo, aunque algunas de estas aplicaciones han generado preocupaciones debido a sus posibles impactos ambientales y riesgos para la salud. Algunas de las aplicaciones más comunes de la malaquita verde incluyen :

- **Tintura Textil:** Tradicionalmente, la malaquita verde se ha utilizado como colorante en la industria textil, proporcionando un distintivo color verde oscuro a los tejidos.
- **Agente Antiparasitario en Acuicultura:** La malaquita verde ha sido empleada como agente antiparasitario en la acuicultura y piscicultura. Se utiliza para tratar infecciones parasitarias en peces y otros organismos acuáticos.

1.2.3.2 Efectos nocivos para la salud humana

Algunos de los efectos nocivos asociados con el verde malaquita son:

- **Toxicidad para Humanos:** La exposición directa o el consumo de productos que contienen malaquita verde puede plantear riesgos para la salud humana. Se han asociado efectos adversos como irritación de la piel, ojos y vías respiratorias, así como posibles efectos más graves en casos de exposiciones prolongadas o ingestión.

Debido a estos efectos adversos, en muchos lugares se han implementado restricciones y regulaciones sobre el uso de la malaquita verde, incentivando la búsqueda de alternativas más seguras y sostenibles en diversas aplicaciones. Es esencial considerar estos riesgos y adoptar prácticas de manejo responsable al utilizar este colorante.

1.2.3.3 Efectos negativos en el ambiente

- **Toxicidad para Organismos Acuáticos:** La malaquita verde, cuando se libera en cuerpos de agua, puede ser tóxica para organismos acuáticos, afectando negativamente a la vida marina y al ecosistema acuático en general.
- **Acumulación en Tejidos:** En aplicaciones agrícolas o acuáticas, la malaquita verde puede acumularse en tejidos de organismos, lo que podría resultar en riesgos secundarios para aquellos que consumen estos organismos.
- **Resistencia Bacteriana:** En el contexto de su uso en microbiología para la tinción de Gram, el uso excesivo de la malaquita verde ha sido asociado con la posible resistencia bacteriana a este compuesto.

1.3 Normatividad mexicana en los contaminantes emergentes

Los colorantes sintéticos como el verde malaquita son compuestos químicos comúnmente utilizados en diversas industrias, como la textil, la alimentaria, la farmacéutica, entre otras anteriormente mencionadas. Estos colorantes se han identificado como contaminantes emergentes debido a su persistencia en el ambiente, sus propiedades tóxicas y su capacidad para bioacumularse en organismos acuáticos, lo que representa un riesgo para la salud humana y la biodiversidad.

La normatividad mexicana, tanto a nivel federal como local, establece regulaciones y límites específicos para la gestión de contaminantes, incluidos los colorantes emergentes. Sin embargo, muchos de estos contaminantes aún no están completamente regulados en términos de sus concentraciones permitidas en agua o en los productos finales, lo que requiere la actualización y el fortalecimiento de las normas ambientales y de salud pública.

El marco normativo mexicano relacionado con los contaminantes emergentes como el verde malaquita incluye diversas leyes, normas oficiales mexicanas (NOM), reglamentos y disposiciones que regulan la calidad del agua, el control de la contaminación y la protección de la salud humana. A continuación, se destacan las más relevantes:

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

En el anexo 3: Establece los límites de sustancias tóxicas en las aguas residuales, las cuales deben ser tratadas para evitar efectos adversos sobre la salud pública y el medio ambiente.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

La LGEEPA establece principios fundamentales para la protección del medio ambiente y regula el manejo de los recursos naturales en México, incluida la gestión de aguas residuales y contaminantes, así mismo regula los criterios de calidad del agua para evitar su deterioro por la presencia de sustancias tóxicas, dentro de estas incluye colorantes como el verde malaquita y cristal violeta.

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996

Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales para su descarga en sistemas de drenaje urbano o industrial. En términos de la gestión de aguas residuales que contienen contaminantes emergentes, se deben tomar en cuenta estos límites para proteger tanto la infraestructura del sistema de drenaje como la salud pública.

NOM-127-SSA1-2021 (Calidad del Agua Potable)

Esta norma regula la calidad del agua para consumo humano y establece los parámetros para la presencia de sustancias químicas y microbianas que pueden afectar la salud. Aunque no se refiere específicamente al verde malaquita y cristal violeta, la presencia de contaminantes emergentes en el agua potable está regulada bajo esta norma, y se podrían incluir nuevas sustancias químicas como estos colorantes a medida que avancen las investigaciones sobre su toxicidad.

Ley de Aguas Nacionales

La Ley de Aguas Nacionales regula la gestión y conservación de las aguas en México. La ley establece que cualquier actividad que involucre el uso de aguas, como la acuicultura o la industria textil, debe cumplir con las regulaciones sobre el tratamiento de aguas residuales y la calidad del agua. Esto incluye el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias como el verde malaquita y cristal violeta, a fin de evitar su liberación en cuerpos de agua.

Reglamento de la Ley General de Salud

El Reglamento de la Ley General de Salud regula la calidad del agua potable y los posibles riesgos para la salud derivados del consumo de agua contaminada con sustancias tóxicas. La presencia de colorantes como el verde malaquita y cristal violeta en el agua potable podría estar regulada bajo los parámetros de calidad del agua para consumo humano.

Contaminantes Emergentes y su Gestión en México

Aunque el colorante verde malaquita es reconocido como contaminante emergente con riesgos potenciales, en México aún no existe una normativa explícita que regule específicamente sus concentraciones en aguas residuales o cuerpos de agua naturales. Sin embargo, las normativas existentes pueden ser aplicadas para evaluar y controlar su presencia.

1.4 Métodos de oxidación avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's), según investigaciones realizadas por Legrini y otros (1993), Huang y otros (1993), y Bolton (1994), se fundamentan en procedimientos fisicoquímicos con la capacidad de inducir cambios significativos en la estructura química de contaminantes. Este concepto fue inicialmente formulado por Glaze y colaboradores (Huang et al., 1993; Glaze, 1987; Glaze et al., 1987), quienes definieron los POA's como procesos que implican la generación y utilización de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo (OH). La generación de este radical puede llevarse a cabo mediante procesos fotoquímicos (incluida la exposición a la luz solar) u otras formas de energía, y destaca por su eficacia en la oxidación de materia orgánica. Algunos POA's, como la fotocatálisis heterogénea, la radiólisis, y otras técnicas avanzadas, incorporan reductores químicos que facilitan transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados (Legrini et al., 1993; Huang et al., 1993).

La definición de POA's se especifica como "aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilos en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos de manera efectiva". Esta categoría de métodos aprovecha la elevada capacidad oxidativa de los radicales OH y varía en la forma en que son generados. Los métodos de oxidación más comúnmente utilizados en combinación son el ozono (O_3), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), la radiación ultravioleta (UV), y la catálisis (Fernández, 2007).

Es relevante señalar que estos procesos se dividen en heterogéneos y homogéneos; estos últimos se clasifican según si requieren o no una fuente externa de alimentación, como se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5 Métodos de oxidación avanzada (Rodríguez et al., 2006).

<i>Procesos homogéneos</i>	
<i>Sin fuente de alimentación externa</i>	Ozonización en medio alcalino (O_3/OH)
	Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2)

*Con fuente de
alimentación externa*

Catalizador y peróxido de hidrógeno ($\text{Fe}_2^+/\text{H}_2\text{O}_2$)

Energía de radiación ultravioleta (UV)

- Ozonización con radiación UV (O_3/UV)
- Peróxido de hidrógeno con radiación UV
- ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$)
- Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación
- UV ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$)
- Foto-Fenton ($\text{Fe}_2^+/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$)

Energía del ultrasonido (US) Sonolisis

- Ozonización con ultrasonido (O_3/US)
- Peróxido de hidrógeno con ultrasonido
- ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{US}$)
- Electroquímica
- Oxidación electroquímica
- Oxidación anódica
- Electro-Fenton

Procesos heterógeneos

Fotocatálisis heterogénea ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$)

En la actualidad, la investigación se centra en la determinación de valores óptimos para diversos parámetros que influyen en el proceso de oxidación, como el pH, la temperatura, el diseño del reactor, la naturaleza y concentración del contaminante, y agentes oxidantes que puedan potenciar la reacción. Asimismo, se examina detalladamente la cinética de la reacción, la cual suele seguir un orden de primer grado con respecto a la concentración de radicales hidroxilos y a la concentración de las especies sujetas a oxidación. Las velocidades de reacción generalmente se encuentran en el rango de 10^8 - $10^{11} \frac{\text{L}}{\text{mol}(s)}$, y la concentración del radical hidroxilo suele oscilar entre 10^{-10} y $10^{-12} \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ moles por litro, siendo una variable de gran importancia en la aplicación práctica del proceso (Rodríguez et al., 2006).

Una característica distintiva de los POA's es que su eficacia para tratar flujos de aguas residuales se limita a concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) menores a $5000 \frac{mg}{L}$ (Rodríguez et al., 2006). Para concentraciones más elevadas, el alto consumo de oxidantes y la mejora en el balance energético del proceso favorecen la preferencia por técnicas de oxidación directa, como la oxidación húmeda. En el caso específico de las aguas residuales de la industria textil, los POA's se aplican especialmente para la reducción del color (Edwards, 2000).

En las aguas residuales textiles, los principales contaminantes incluyen sólidos en suspensión, demanda química de oxígeno altamente recalcitrante, tintes que confieren un color intenso y otras sustancias solubles. La eliminación del color de las aguas residuales de la industria textil y de la fabricación de colorantes representa una importante preocupación ambiental, con un impacto significativo en términos de consumo primario de agua y la descarga de aguas.

Las principales ventajas de los POA's en comparación con métodos tradicionales, según Scott (1995), son:

- No solo cambian la fase del contaminante, sino que también lo transforman químicamente.
- Generalmente logran la mineralización completa, es decir, la destrucción o la obtención de CO_2 y H_2O .
- No generan lodos que requieran tratamiento o disposición adicional.
- Son altamente eficaces para abordar contaminantes resistentes a otros métodos de tratamiento, especialmente al tratamiento biológico.
- Resultan efectivos en el tratamiento de contaminantes presentes en concentraciones muy bajas (ppb).
- Minimizan la formación de subproductos de reacción, o estos se generan en concentraciones reducidas.

- Funcionan en rangos donde los sistemas convencionales no son prácticos.
- Son ideales para reducir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- Mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- Requieren considerablemente menos energía en comparación con otros métodos, como la incineración.
- Permiten la transformación de contaminantes resistentes en productos tratables posteriormente, mediante métodos más económicos como el tratamiento biológico.
- Eliminan los efectos sobre la salud asociados con desinfectantes y oxidantes residuales, como el cloro.
- Resultan óptimos para preparar las corrientes para tratamientos convencionales y aumentan la biodegradabilidad.

Los métodos de oxidación son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico, especialmente para contaminantes que son resistentes a la biodegradación, o como proceso de post tratamiento para refinar las aguas antes de su descarga a cuerpos receptores (Scott, 1995).

Estos procesos implican una oxidación química en condiciones suaves de presión y temperatura, llevando a la mineralización completa de contaminantes. El agente oxidante principal es el radical hidroxilo (OH), que exhibe una alta capacidad oxidante y tiempos de reacción muy cortos. Debido a la extrema reactividad de estas especies, es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos, logrando así una reducción en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el Carbono Orgánico Total (COT) y la toxicidad en las aguas residuales tratadas.

Además, la generación de radicales se lleva a cabo mediante oxígeno, agua oxigenada y catalizadores soportados, lo que asegura que los subproductos de reacción sean exclusivamente agua y dióxido de carbono (CO₂). La Tabla 6 indica la capacidad de oxidación, medida a través del potencial de oxidación, de diferentes

compuestos. Los compuestos con mayor potencial son aquellos que participan en los POA's.

Tabla 6 Potenciales redox de algunos agentes oxidantes.

Especie	E_o (V, 25°C)
Flúor (F)	3.03
Radical hidroxilo (OH)	2.80
Oxígeno atómico	2.42
Ozono (O₃)	2.07
Peróxido de hidrógeno (H₂O₂)	1.78
Radical perhidroxilo (HO₂)	1.70
Permanganato (MnO₄)	1.68
Dióxido de cloro (HClO₂)	1.57
Ácido hipocloroso (HClO)	1.49
Cloro (Cl₂)	1.36
Bromo (Br)	1.09

La investigación en este ámbito ha estado mayormente enfocada en el desarrollo de nuevas estrategias de tratamiento para aguas residuales sintéticas que predominantemente contienen colorantes azoicos, la categoría más extensa de tintes empleados en industrias como la textil, médica y de tensoactivos. Estos colorantes son responsables de la generación de espuma en la superficie de los ríos, irregularidades en el crecimiento de algas (eutrofización) y toxicidad para algunos organismos acuáticos. Sin embargo, se han realizado escasos estudios que utilicen aguas residuales sintéticas textiles o aguas residuales reales procedentes de distintas etapas en la fabricación textil y farmacéutica.

En la Tabla 7, se presentan algunas ventajas y desventajas asociadas al empleo de métodos de oxidación en la eliminación de contaminantes emergentes.

Tabla 7 Ventajas y desventajas de los POA's (Robinson, 2001; Hai, 2007).

Método	Ventajas	Desventajas
POA's	Genera una gran cantidad de radicales libres altamente reactivos y supera concreces los oxidantes convencionales en decoloración.	Los POA's en general pueden producir subproductos tóxicos indeseables adicionales y la mineralización completa puede no ser posible. La presencia de captadores de radicales reduce

UV/O₃

	la eficiencia de los procesos, algunos de los cuales dependen del pH.
Aplicado en estado gaseoso, no presenta alteración del volumen. Buena eliminación de casi todos los tipos de colorantes. No implica la formación de lodos, requiere tiempos de reacción cortos.	La eliminación depende del pH (neutral a ligeramente alcalino); mala eliminación de tintes dispersos. Manejo problemático, imponer carga adicional de agua con ozono. No hay eliminación de DQO. Alto costo de generación junto con una vida media muy corta y limitación de transferencia de masa de gas licuado; sufre de limitación de penetración de luz UV. Aumento del nivel de turbidez en los efluentes.

UV/H₂O₂

No implica la formación de lodos, requiere tiempos de reacción cortos y puede ser posible reducir la DQO hasta cierto punto.	No es aplicable a todos los tipos de colorantes, requiere la separación del sólido suspendido y sufre limitaciones de penetración de luz UV. Se requiere un pH más bajo para anular el efecto de los eliminadores de radicales.
--	---

Fentón

Decoloración efectiva de contaminantes emergentes tanto solubles como insolubles; aplicable	Efectivo para un rango de pH <3.5. Tiempo de reacción comparativamente más largo requerido. lodos.
---	--

	incluso con alta concentración de sólidos suspendidos. Equipo simple y fácil implementación. Posible reducción de DQO.	
Ozonización	Se aplica en estado gaseoso: sin alterar su volumen.	Vida media corta (20 minutos)
Fotocatálisis	Sin producción de lodos, reducción considerable de DQO, potencial de utilización de luz solar.	Limitación de la penetración de la luz, ensuciamiento de los catalizadores y problema de separación fina del catalizador del líquido tratado.
Electroquímica	Decoloración efectiva de contaminantes emergentes solubles/insolubles; posible reducción de DQO. No se ve afectado por la presencia de sal en las aguas residuales. Los compuestos de descomposición no son peligrosos.	La producción de lodos y la contaminación secundaria (de compuestos orgánicos clorados, metales pesados) están asociados con la electrocoagulación la oxidación indirecta, respectivamente. La oxidación anódica directa requiere un mayor desarrollo para la aceptación industrial. El alto costo de la electricidad es un impedimento. La eficiencia depende de la naturaleza del contaminante.

Fotoquímica Sonolisis	Sin formación de lodos.	Formación de subproductos.
	La adición de aditivos químicos no es necesaria y, por lo tanto, no produce un exceso de lodo.	Requiere una gran cantidad de gas disuelto (O_2); La decoloración completa y la mineralización o por sonificación no son económicas en el nivel actual de desarrollo del reactor.
Radiación ionizante	Sin producción de lodos; oxidación efectiva a escala de laboratorio.	Requiere una gran cantidad de O_2 disuelto; decoloración completa y mineralización por aplicación independiente no es posible. Aumento de la eficiencia energética aún por lograr.
Oxidación del aire húmedo	Tecnología establecida especialmente adecuada para efluentes demasiado diluidos para la incineración y demasiado tóxicos y/o concentrados para el tratamiento biológico.	No se logra la mineralización completa, ya que los compuestos de menor peso molecular no son susceptibles a la oxidación de aire húmedo. Los altos costos de capital están asociados con la presión y temperatura de operación elevadas.

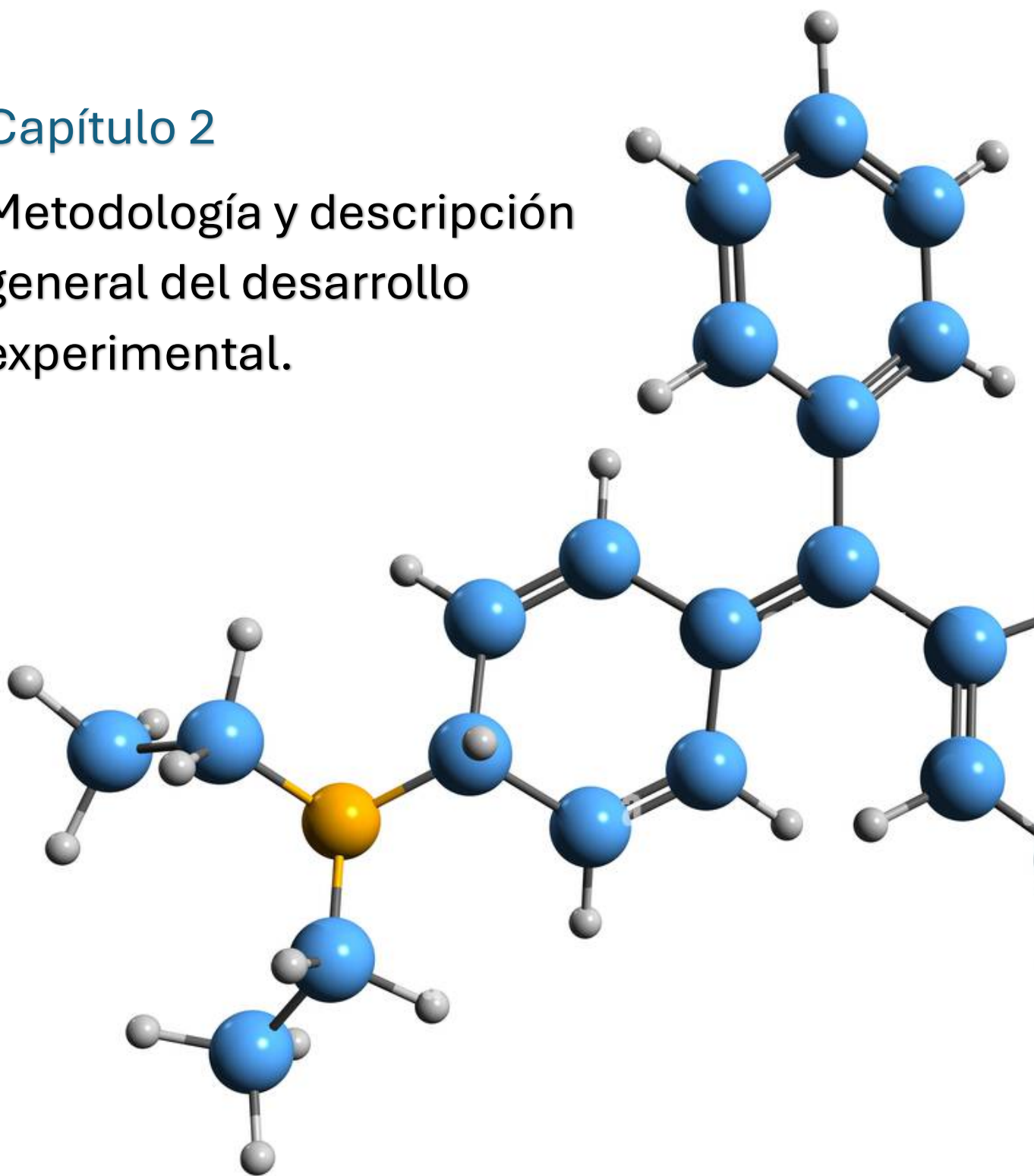
La gestión de contaminantes vertidos en efluentes por parte de la industria textil representa un desafío significativo. Por esta razón, es crucial reducir el impacto ambiental asociado. En la Tabla 8 siguiente se presentan algunas ventajas y desventajas del empleo de ciertos Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) en el proceso de decoloración de contaminantes textiles.

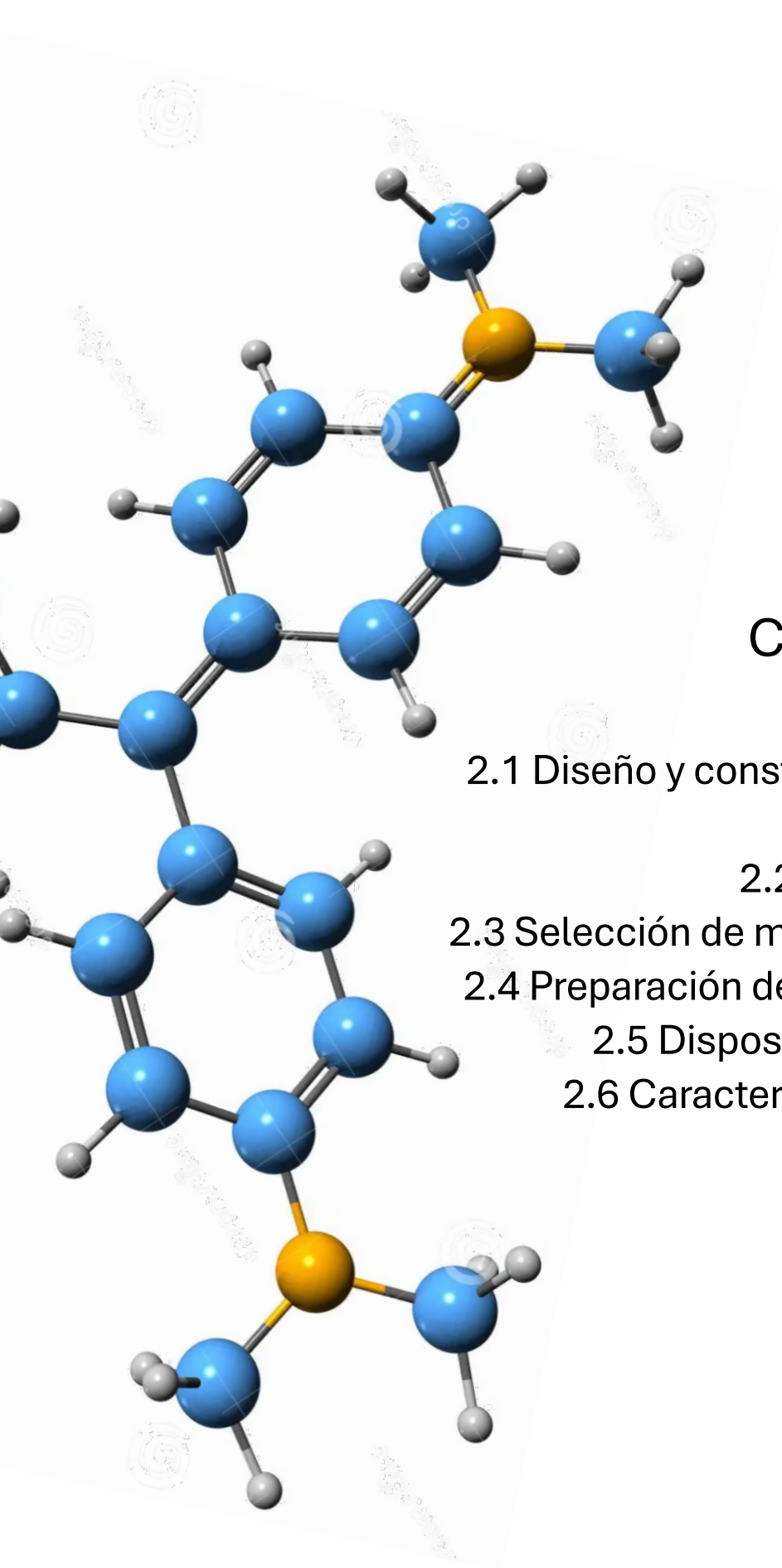
Tabla 8 Ventajas y desventajas de las tecnologías para la decoloración de contaminantes textiles (Hai et al., 2007).

Métodos Fisicoquímicos	Descripción método	Ventajas	Desventajas
Reacción Fentón	Reacción de oxidación usando H_2O_2 -Fe(II)	Decoloración efectiva de tintes solubles e insolubles	Generación de lodo
Ozonización	Reacción de oxidación usando gas de ozono	Aplicación en estado gaseoso; no altera el volumen	Corta vida media (20 min)
Fotoquímica	Reacción de oxidación usando H_2O_2 -UV	No produce lodo	Formación de sub-productos
NaCl	Reacción de oxidación usando Cl^+ para atacar al grupo amino	Iniciación y aceleración de la ruptura del enlace	Libera aminas aromáticas
Electroquímica	Reacción de oxidación usando electricidad	Descompone en compuestos no peligrosos	Alto costo de la electricidad
Carbón activado	Remoción de tinte por adsorción	Buena remoción de una variedad de tintes	Muy costoso
Filtración por membranas	Separación física	Remoción de todos los tintes	Producción de lodo concentrado
Intercambio iónico	Resinas de intercambio iónico	Regeneración, no se pierde el adsorbente	No es efectiva para todos los tintes
Coagulación electrocinética	Adición de sulfato ferroso y cloruro férrico	Económicamente variable	Alta producción de lodo

Capítulo 2

Metodología y descripción
general del desarrollo
experimental.





Contenido general del capítulo

2.1 Diseño y construcción de reactor en
cuatro fases.

2.2 Reactivos utilizados.

2.3 Selección de método de tratamiento.

2.4 Preparación de la solución sintética.

2.5 Dispositivos experimentales.

2.6 Caracterización de la muestra.

Capítulo 2. Metodología

Descripción general del desarrollo experimental

En este capítulo se expone la metodología empleada en el presente proyecto de investigación, dividida principalmente en dos etapas.

La primera etapa del proyecto se enfocó en el diseño, construcción y evaluación preliminar de un reactor de tratamiento con la capacidad de recircular la solución sintética. La figura 9 presenta el procedimiento global del dispositivo experimental, el cual será explicado en detalle en secciones posteriores.

La segunda etapa se centró en el tratamiento del colorante verde malaquita, ampliamente utilizado en la industria textil. La decoloración de estos compuestos fue evaluada mediante Procesos de Oxidación Avanzada, utilizando un reactor con configuración de recirculación. Se examinaron diversos métodos, como UV, O_3 , H_2O_2 , UV+ O_3 + H_2O_2 , O_3 + H_2O_2 , UV+ O_3 , y UV+ H_2O_2 . La concentración inicial del colorante fue de 30 ppm en un volumen constante de 400 mL. Se realizaron caracterizaciones del líquido residual utilizando un espectrómetro UV-visible antes, durante y después del tratamiento, con muestreos cada 10 minutos hasta los 60 minutos. Además, se llevó a cabo un análisis cualitativo observando el cambio de color de las muestras a lo largo del tiempo, como se muestra en la figura 8, que representa un resumen de las primeras tres etapas del experimento. Detalles adicionales se proporcionarán más adelante.

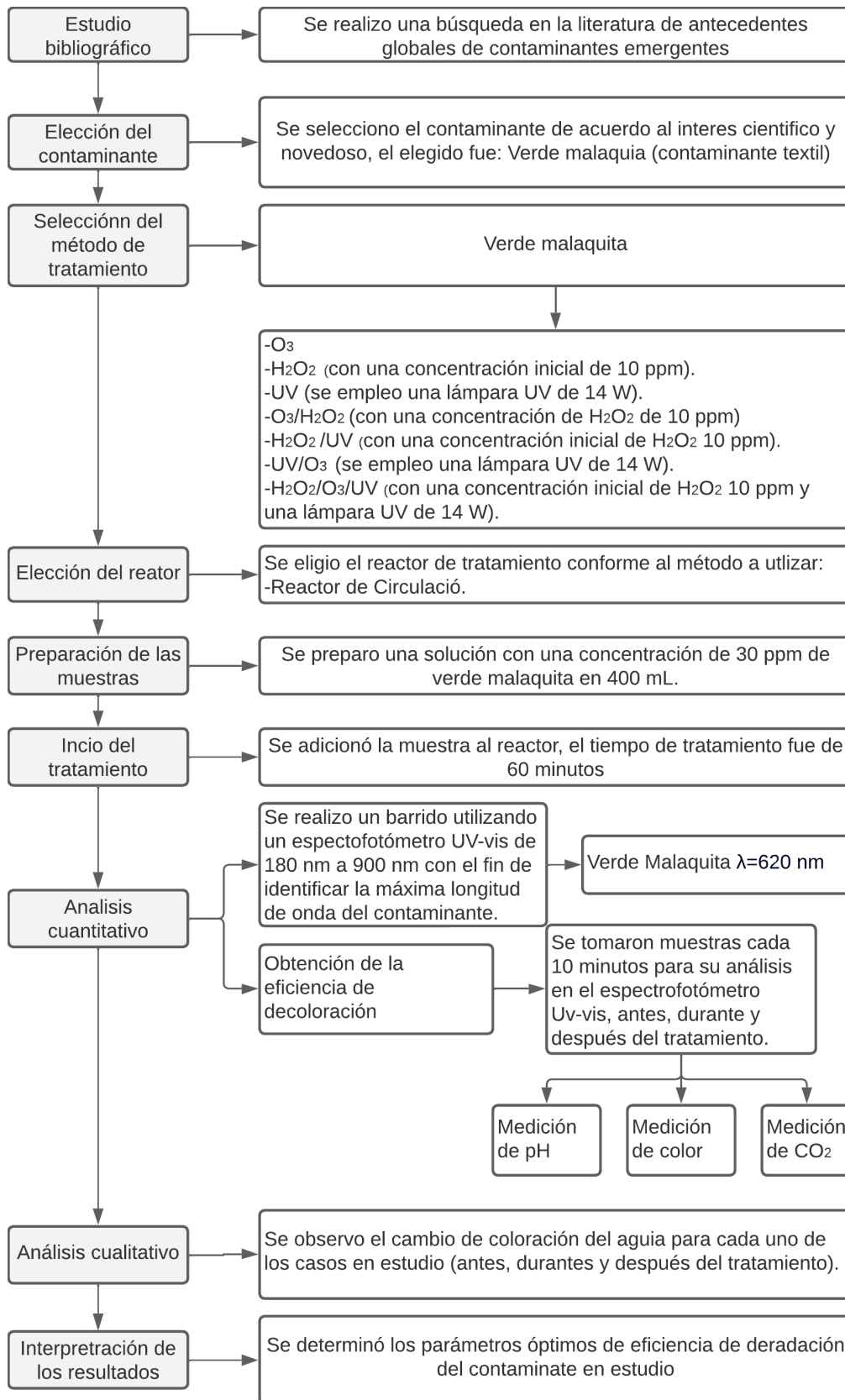


Figura 8 Diagrama global del desarrollo experimental.

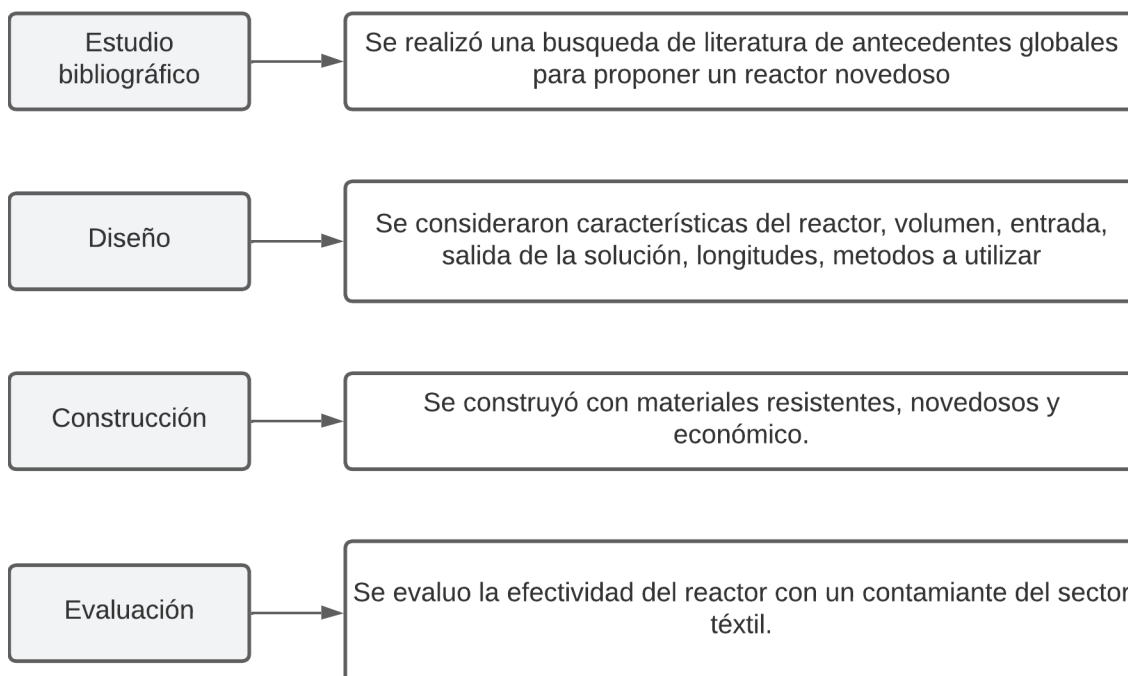


Figura 9 Procedimiento global del dispositivo experimental.

2.1 Diseño y construcción del reactor en cuatro fases

El proceso de determinar la configuración y construcción del reactor de tratamiento se llevó a cabo en cuatro etapas fundamentales, las cuales se detallan a continuación:

Primera etapa: Revisión bibliográfica

Se recopiló información sobre los avances en la aplicación de los Procesos de Oxidación Avanzada para degradar contaminantes orgánicos en agua. Además, se llevó a cabo una búsqueda de trabajos publicados relacionados con el diseño de diversos reactores y su interacción con diferentes métodos de estudio.

Segunda etapa: Diseño del reactor de tratamiento

Se optó por un reactor con la capacidad de recircular la solución de estudio, considerando su facilidad de construcción, manipulación y operación. Se creía que esta elección podría aumentar la eficacia al permitir la combinación simultánea de diversos agentes oxidantes y radiación ultravioleta.

Tercera etapa: Construcción del reactor de tratamiento

En esta fase, se seleccionaron inicialmente los materiales de construcción, asegurándose de que no afectaran el proceso, fueran accesibles, duraderos y maleables. Posteriormente, se llevó a cabo la construcción del reactor.

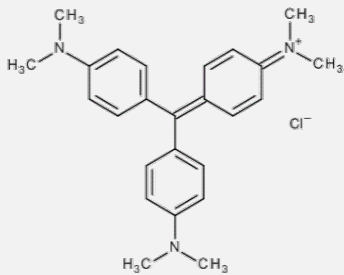
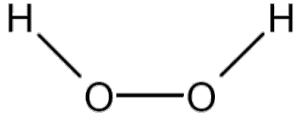
Fase 4: Preparación e inicio de ensayos iniciales

En esta etapa, se llevó a cabo la instalación de varios componentes que constituyen el sistema de tratamiento, seguido por el comienzo de las primeras pruebas de aplicación del reactor de tratamiento. Los resultados de estas pruebas se presentan en el siguiente capítulo.

2.2 Reactivos utilizados

En la Tabla 9 se describen los reactivos para la realización del presente proyecto de investigación así, como sus propiedades fisicoquímicas más importantes.

Tabla 9 Reactivos empleados.

Reactivo	Estructura molecular	Características
Verde malaquita		• Fórmula química: $C_{23}H_{25}N_2$ • Masa molecular: 323.28 g/mol • Solubilidad en agua 24 °C de 110 g/L • Declaración de peligro: Nocivo por ingestión • Estado físico: Polvo (sólido)
H_2O_2		• Fórmula química: H_2O_2 • Masa molecular: 34.01 g/mol • Solubilidad en agua: Soluble

O_3	$O=O=O$	• Declaración de peligro: H314, Causas severas quemaduras en la piel, • H302, Nocivo por ingestión, H332, Nocivo por inhalación. H335, Puede irritar las vías respiratorias, H272 Puede intensificar las vías respiratorias. • Estado físico: Líquido • Fórmula química: O_3 • Masa molecular: 48 g/mol • Solubilidad en agua: 570 (mg/L, 20 °C) • Declaración de peligro: H351, Se sospecha que puede provocar cáncer en caso de inhalación, H335, Puede irritar las vías respiratorias. • Estado físico: Gas
UV	NA	• Utiliza radiación ultravioleta por medio de una lámpara. • Emite a una longitud de 254 nm

2.3 Selección del método de tratamiento

Se emplearon distintos Procesos de Oxidación Avanzada para abordar el tratamiento del colorante objeto de estudio, y en la Tabla 10 se presenta la información específica referente al tratamiento del verde malaquita.

Tabla 10 Estudios efectuados al verde malaquita.

Método	Tiempo de tratamiento					
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
UV	X	X	X	X	X	X
O₃	X	X	X	X	X	X
H₂O₂ (10 ppm)	X	X	X	X	X	X
O₃/H₂O₂ (10 ppm)	X	X	X	X	X	X
O₃/UV	X	X	X	X	X	X
UV/H₂O₂ (10 ppm)	X	X	X	X	X	X
O₃/UV/H₂O₂ (10 ppm)	X	X	X	X	X	X

2.3.1 Proceso de Decoloración mediante Ozono (O₃)

La producción de ozono se realizó mediante un generador comercial que emplea aire atmosférico. El ozono se introdujo en forma de microburbujas utilizando una piedra difusora para asegurar un mayor contacto con los contaminantes, facilitando así los procesos químicos deseados que conducen a la degradación de los contaminantes estudiados.

2.3.2 Proceso de Decoloración mediante Radiación Ultravioleta (UV)

Se empleó una lámpara (a lo largo de todo el tratamiento) que emite en la región ultravioleta a 254 nm, con una potencia de 14 W. En ambos reactores de tratamiento, la lámpara fue protegida por un tubo de cuarzo.

2.3.3 Proceso de Decoloración mediante Adición de Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)

Se utilizó peróxido de hidrógeno al 30%. El H_2O_2 se añadió directamente al reactor de tratamiento al inicio de la experimentación. Es relevante destacar que se evaluó el impacto de la concentración inicial en la decoloración del contaminante estudiado.

2.4 Preparación de la Solución Sintética

Se procedió a la elaboración de soluciones sintéticas del colorante bajo investigación (verde malaquita). Para este propósito, se pesaron 0.03 g del colorante, se vertieron en vasos de precipitados de 500mL y se completaron hasta 400 mL con agua destilada. Luego, se agitaron en una parrilla a 100 rpm durante 5 minutos para asegurar su homogeneización.

2.5 Dispositivos Experimentales

Reactor de Recirculación:

Se utilizó un reactor de forma cuadrada con un espiral interno que permitía la recirculación. El objetivo fue mantener la solución contaminada en constante contacto con los agentes oxidantes, maximizando así los efectos positivos cuando se utilizan en combinación.

En la figura 10 se visualiza el dispositivo experimental empleado en la decoloración de los contaminantes emergentes mediante Métodos de Oxidación Avanzada (O_3 , H_2O_2 , UV). Este consta de:

- Un reactor de tratamiento cuadrado de madera cubierto con papel aluminio comercial con dimensiones de 30 cm de longitud y 15 cm de diámetro. En su parte interior alberga: un espiral de vidrio transparente con capacidad de tener flujo interno.
- Una lámpara ultravioleta que emite a una longitud de onda de 254 nm, ubicada dentro de un tubo de cuarzo para evitar cortocircuitos y pérdida de radiación.

- Un generador de ozono comercial que utiliza aire atmosférico, suministrando ozono en forma de microburbujas al interior del reactor para optimizar el contacto con la solución sintética.
- Un espectrómetro UV-visible para la caracterización de las muestras antes, durante y después del tratamiento.
- Un medidor multiparamétrico de agua para la medición de pH, conductividad eléctrica y temperatura.

La solución sintética es introducida en el depósito, desde donde se impulsa hacia la parte superior del reactor de tratamiento. Posteriormente, se recupera nuevamente en el depósito y se recircula mediante una bomba peristáltica.

El ozono (O_3) se introduce en el depósito utilizando un difusor de para asegurar una distribución uniforme en todo el contenido mediante microburbujas. Por otra parte, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se añade directamente al depósito al inicio del proceso. Con fines analíticos, se tomaron muestras antes del tratamiento y cada 10 minutos hasta transcurrir 60 minutos, utilizando un espectrómetro UV-visible. Al mismo tiempo, se registraron los valores de pH y color. Además, se llevó a cabo una titulación de CO_2 .

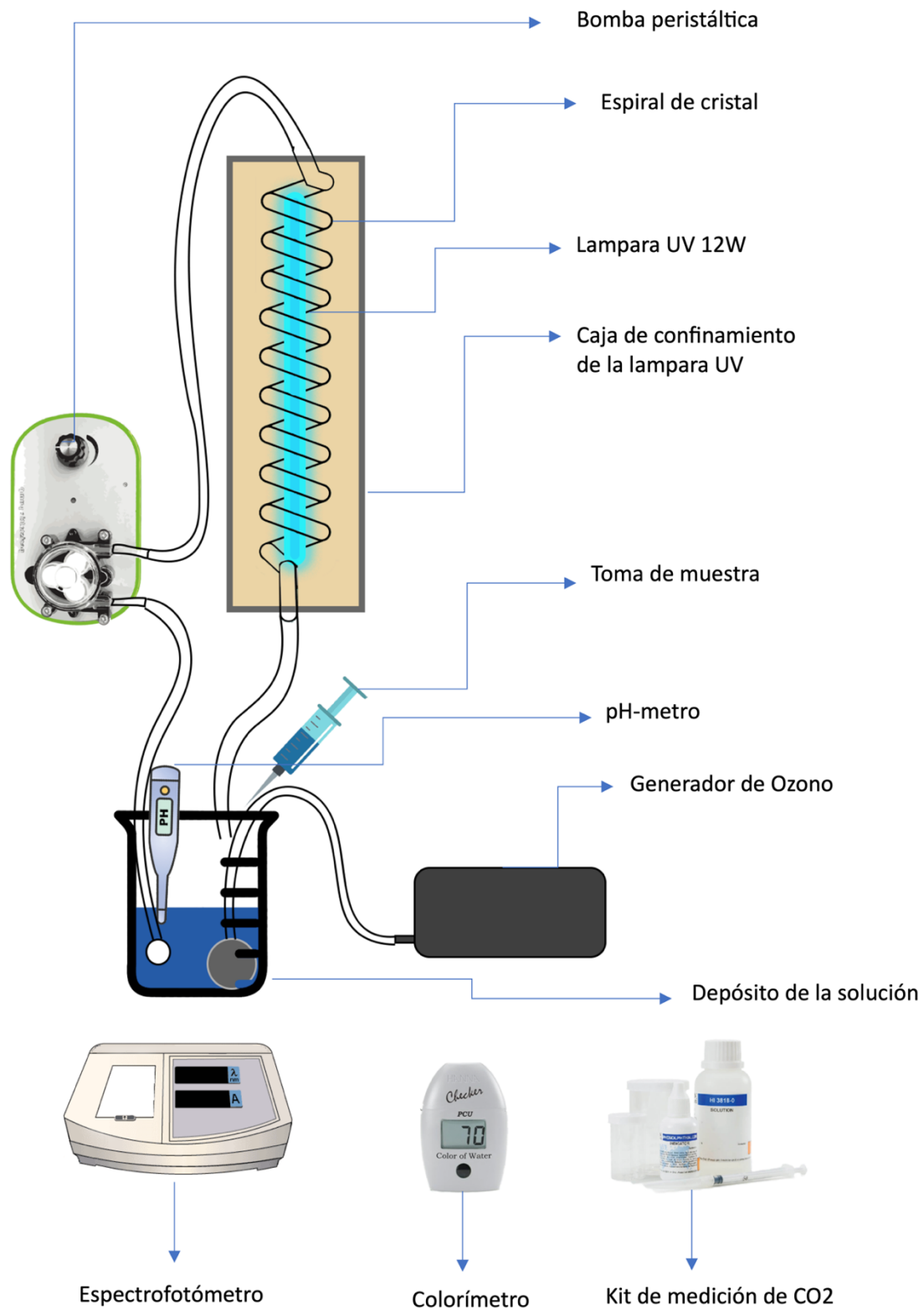


Figura 10 Reactor de tratamiento

2.6 Caracterización de la muestra

- **Análisis cuantitativo**

La determinación del cambio de color y de pH se llevo a cabo mediante el uso de instrumentación: un colorimetro y un pHmetro (ambos digitales). Dichos instrumentos fueron utilizados en intervalos de 10 minutos durante los 60 minutos del proceso, esto con el fin de recopilar los datos arrojados en cada muestra.

- **Análisis cualitativo**

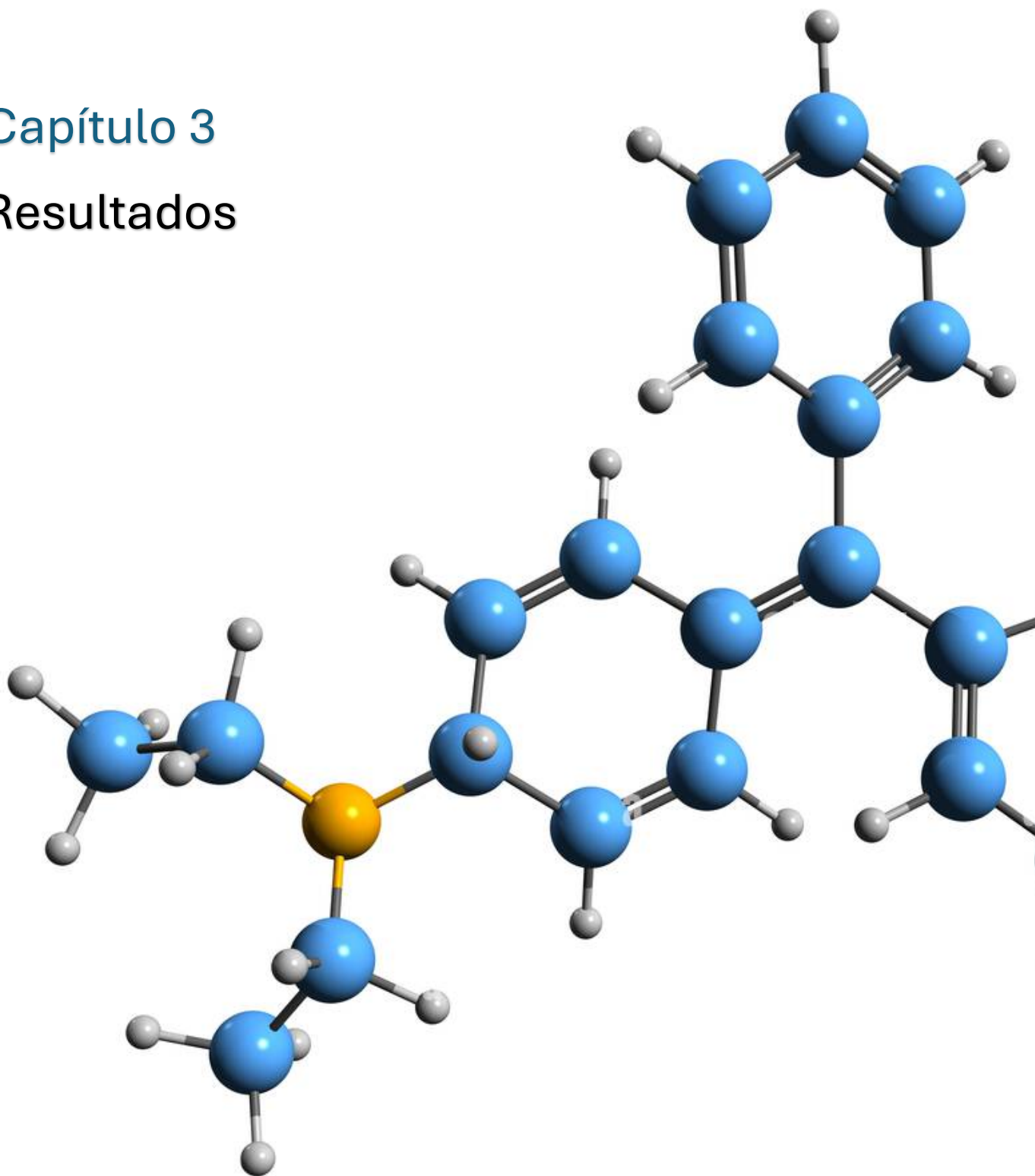
El análisis cualitativo consistió en la observación del cambio de coloración de las muestras antes, y después de su tratamiento utilizando diversos métodos de oxidación avanzada (figura 11).

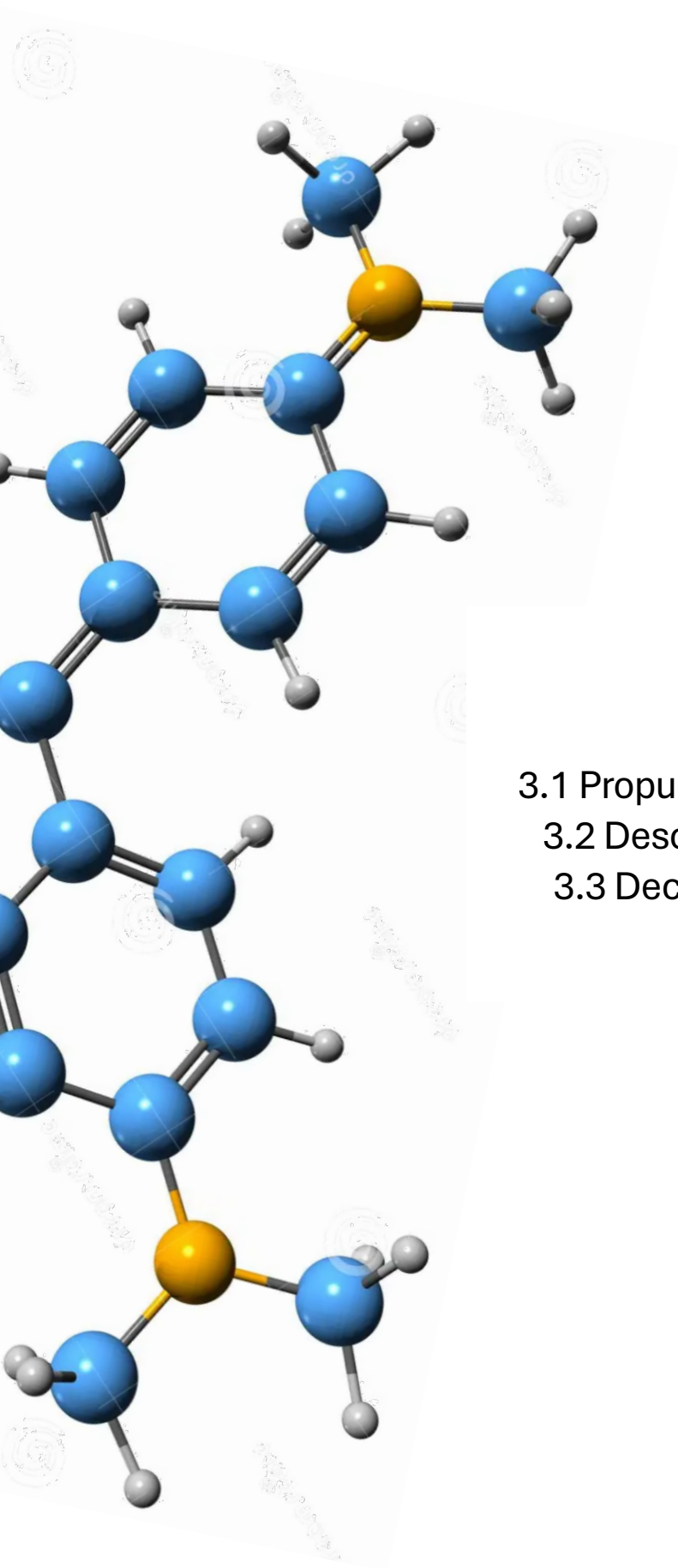


Figura 11 Decoloración del verde malaquita por $H_2O_2/UV/O_3$

Capítulo 3

Resultados





Contenido general del capitulo

- 3.1 Propuesta de reactor de tratamiento.
- 3.2 Descripción global de los hallazgos
- 3.3 Decoloración del Verde Malaquita.

CAPÍTULO 3: Resultados y discusión

3.1 Descripción global de los hallazgos

En este capítulo, se exponen los resultados obtenidos, los cuales se dividirán en dos secciones principales. En la primera, se describe el diseño del reactor de tratamiento para su posible aplicación en el futuro tratamiento de otros contaminantes orgánicos presentes en el agua. Es relevante señalar que se llevó a cabo un estudio preliminar del funcionamiento del reactor, arrojando resultados satisfactorios.

En la segunda sección se detallarán los resultados derivados de la aplicación de métodos de oxidación avanzada en la eliminación del colorante verde malaquita, presente en aguas residuales de los sectores textil, alimenticio y ganadero. Se evaluó el impacto de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's), el tiempo de tratamiento y se realizó un análisis cualitativo del cambio en la coloración a lo largo del tiempo.

3.2 Propuesta del reactor de tratamiento

3.2.1 Diseño del Reactor de recirculación

Se concibió y fabricó un reactor de tratamiento de recirculación con una configuración cuadrada, utilizando papel aluminio comercial como material de reflexión. Este material fue seleccionado debido a su facilidad reflectora, aplicado a la luz UV, esto hace que tenga mayor impacto en la ayuda de los agentes oxidantes empleados en Métodos de Oxidación Avanzada, además de ser una opción económica. Las dimensiones del reactor son de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud.

El reactor cuenta con una forma cuadrada de madera, mismo que de manera interna cuenta con un espiral de vidrio que permite el paso de fluidos en su interior, mismo que por su forma puede albergar una lámpara de luz ultravioleta de 15 W que emite a una longitud de onda de 254 nm, protegida por un tubo de cuarzo situado en el centro del dispositivo. Por la parte de afuera se incorpora un vaso de precipitados que interactúa como el depósito de nuestra muestra, este de manera interna

incorpora una piedra difusora que suministra ozono en forma de microburbujas mediante un generador de aire atmosférico, al mismo tiempo que mantiene la muestra en constante agitación. Por su forma tiene versatilidad para la toma de muestras, y brinda una visualización del proceso de forma segura. Se emplea un pHmetro, para medir el pH en cada intervalo de tiempo, así mismo un colorímetro con unidades platino cobalto para medir el gradiente decoloración presente en cada una de las reacciones. La figura 12 exhibe el reactor de tratamiento con las características mencionadas anteriormente. Es importante destacar que esta propuesta está destinada para aplicaciones futuras en la eliminación de otros contaminantes.

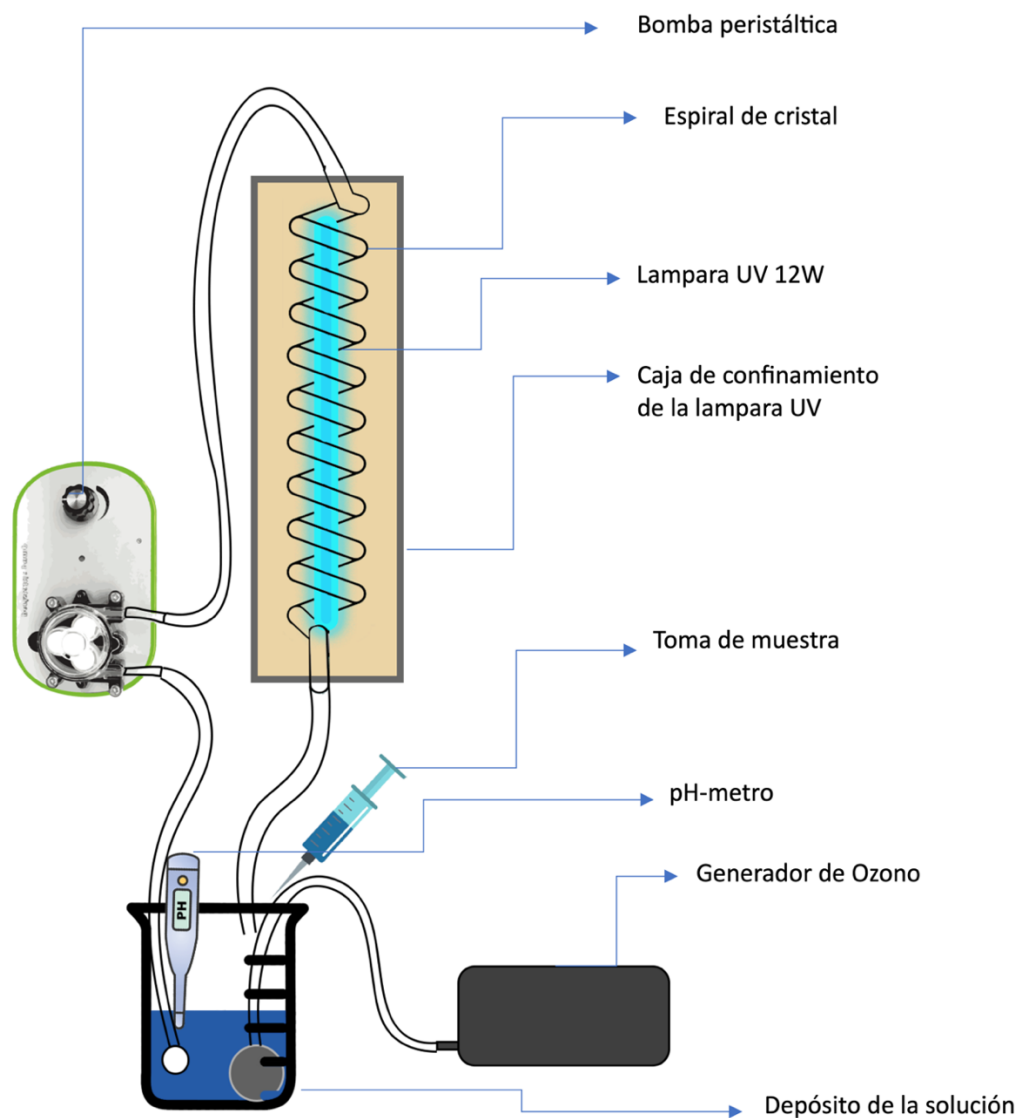


Figura 12 Reactor de recirculación propuesto.

3.2.2 Aplicaciones preliminares

Se realizó una experimentación previa, con distinto contaminante emergentes, el cual fue cristal violeta. El tiempo de tratamiento fue de 30 minutos, tomando muestras cada 10 minutos para su análisis mediante espectrometría UV- visible.

A partir de los resultados obtenidos mediante la implementación de técnicas de oxidación avanzada con el fin de descolorar el contaminante emergente verde malaquita, se evidencia una variación en los porcentajes de descoloración. Esto se debe a que el compuesto presenta un elevado peso molecular, y ciertos grupos funcionales no son susceptibles a degradación mediante los métodos empleados, lo que resulta en una eficacia reducida. Es importante señalar que se lograron mejores resultados al combinar dos agentes oxidantes en comparación con la aplicación de uno solo.

El porcentaje de degradación del verde malaquita fue inminente en distintos métodos, esto debido a las diferentes reacciones químicas producidas por los procesos de oxidación avanzada, los cuales se pueden ver en la Tabla 11.

Tabla 11 Porcentaje de degradación del verde malaquita obtenidos en los distintos métodos de oxidación avanzada.

Contaminante	Método	% Degradación
Verde malaquita	O ₃	86%
	UV	8.5%
	H ₂ O ₂ /O ₃	85%
	H ₂ O ₂ /O ₃ /UV	98%

A continuación, la Tabla 12 describe el porcentaje de decoloración del verde malaquita obtenido en los distintos métodos de oxidación avanzada que brindaron una mejor eficiencia:

Tabla 12 Porcentaje de decoloración del verde malaquita obtenido en los distintos métodos de oxidación avanzada.

Contaminante	Método	%Decoloración
Verde malaquita	O ₃	0%
	UV	
	H ₂ O ₂ /O ₃	
	H ₂ O ₂ /O ₃ /UV	

La utilización de ozono (O₃) demostró una eficacia moderada en la eliminación del contaminante bajo estudio. Los resultados de la aplicación de este agente oxidante fueron notables, ya que su capacidad de oxidación es equiparable a la de los radicales hidroxilos (OH). La influencia del ozono en la descoloración de los contaminantes se evidenció en el análisis cualitativo, revelando un cambio de color a los 10 minutos.

En cuanto al peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y al ozono (O₃), se observó una eficacia satisfactoria que generó resultados favorables. No obstante, la baja concentración del oxidante presentaba un efecto inhibitorio en la descoloración de los contaminantes en estudio. En lugar de actuar directamente sobre el contaminante, la baja concentración afectaba a los radicales, lo que resultaba en una disminución en la efectividad del proceso.

La combinación de O₃/UV/H₂O₂ demostró una eficacia optima en la descoloración de contaminantes emergentes. La eficiencia conjunta alcanzó niveles significativos, destacando la idoneidad del reactor de tratamiento para abordar dichos contaminantes. Esto sugiere la viabilidad de llevar a cabo estudios adicionales con distintos contaminantes.

En el caso específico del reactor propuesto, se evidenció una efectividad satisfactoria sin pérdida apreciable ni de la muestra ni del agente oxidante. Los resultados obtenidos son de importancia crucial para su potencial aplicación en investigaciones futuras.

Los métodos de oxidación avanzada presentan una alternativa viable para la decoloración de contaminantes emergentes, especialmente para el colorante analizado. Aunque este colorante exhibe características diversas, su decoloración resultó aceptable. Es imperativo determinar concentraciones óptimas de $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$ que maximicen la eficiencia de decoloración, lo que podría conducir a resultados aún más prometedores.

3.3 Decoloración del Verde Malaquita

3.3.1 El efecto del O_3

En la figura 13 se representan los resultados de degradación del verde malaquita con O_3 . En todos los escenarios de estudio, se evidencia una mejora en la eficacia de la decoloración a medida que se prolonga el tiempo de tratamiento. Se logra alcanzar eficacias de degradación de hasta un 96.6%.

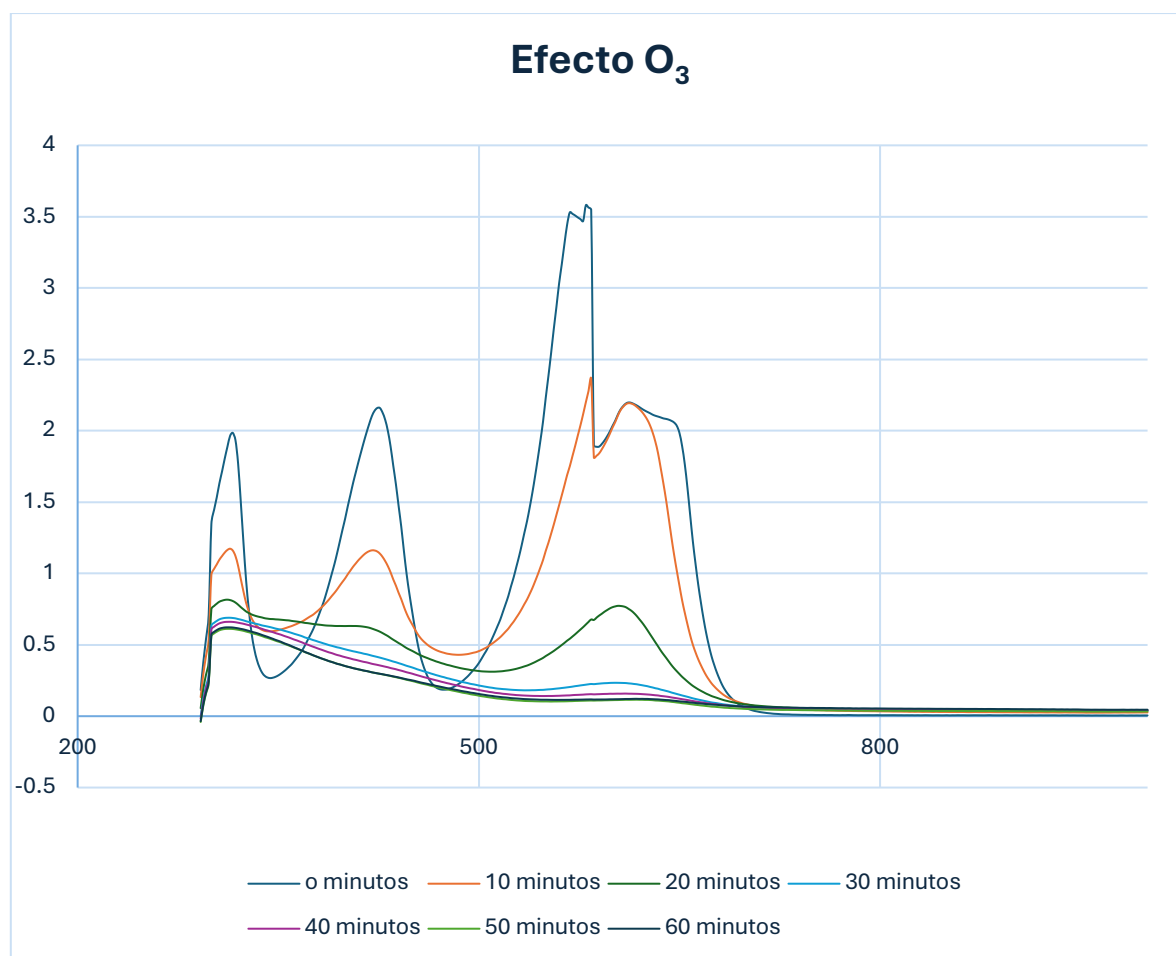


Figura 13 Resultados de la degradación de verde malaquita con O_3

Los resultados se deben a diferentes mecanismos cinéticos diseñados para producir radicales con un fuerte poder de oxidación, en particular los radicales hidroxilos (OH). Estos radicales, al entrar en contacto con el contaminante, pueden lograr su decoloración, degradación e incluso su mineralización. La generación de estas especies químicas está vinculada al método específico de tratamiento utilizado.

Sin embargo, según algunos investigadores (Moctezuma et al., 2016), han señalado que se trata de una reacción de lenta velocidad. Por lo tanto, para lograr eficiencias elevadas de decoloración, es necesario extender los tiempos de tratamiento. Este fenómeno se observó en los resultados obtenidos, donde se alcanzaron eficiencias de decoloración de hasta un 80% después de 60 minutos de tratamiento.

En la tabla 13 se muestran los distintos parámetros obtenidos (color y pH) obtenidos en las muestras recolectadas en cada intervalo de tiempo de 10 minutos. Cabe mencionar que se utilizó un colorímetro con unidades platino cobalto (UPC), y un pHmetro eléctrico.

Tabla 13 Parámetros de color y pH obtenidos con el uso de O₃.

Tiempo	Color (UPC)	pH
0 min	500	4.56
10 min	500	4.02
20 min	500	3.86
30 min	500	3.81
40 min	500	3.51
50 min	500	3.62
60 min	500	3.58

De acuerdo con la tabla anterior, de forma cuantitativa fue notorio un cambio de pH, mismo que de forma cualitativa se logra apreciar el cambio de coloración a amarillento (figura 14), esto debido a que la velocidad de reacción del ozono fue relativamente lenta y dio paso a generar un subproducto. Pesé que para verde malaquita se requiere un tiempo prolongado de contacto con el ozono para

experimentar una descomposición significativa, tiende a dar lugar a subproductos indeseados.

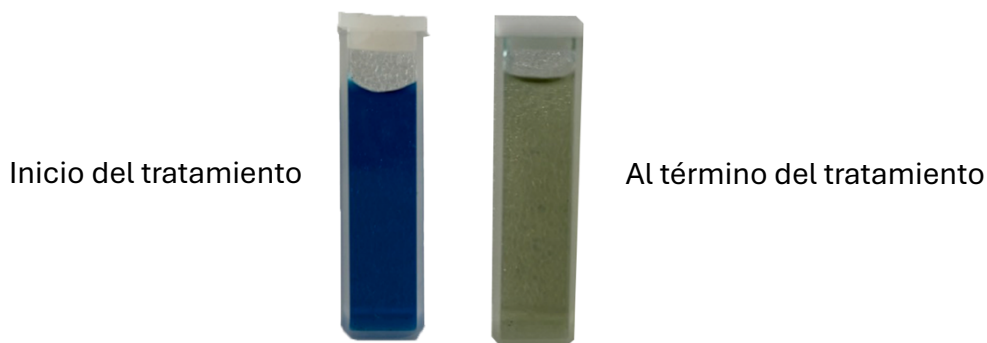


Figura 14 Decoloración del verde malaquita con O_3

Por último, se determinó la cantidad de CO_2 presente.

$$(0.53)(100)=53\text{ppm.}$$

3.3.2 Efecto del UV.

En la figura 15 se observan los resultados obtenidos de degradación de verde malaquita con el uso de UV. Se observa una baja eficiencia debido a que depende de otros reactivos, como H_2O_2 o O_3 para mejorar la eficacia en la eliminación del colorante, puesto que por si sola no logra fotolizar el contaminante Figura 15.

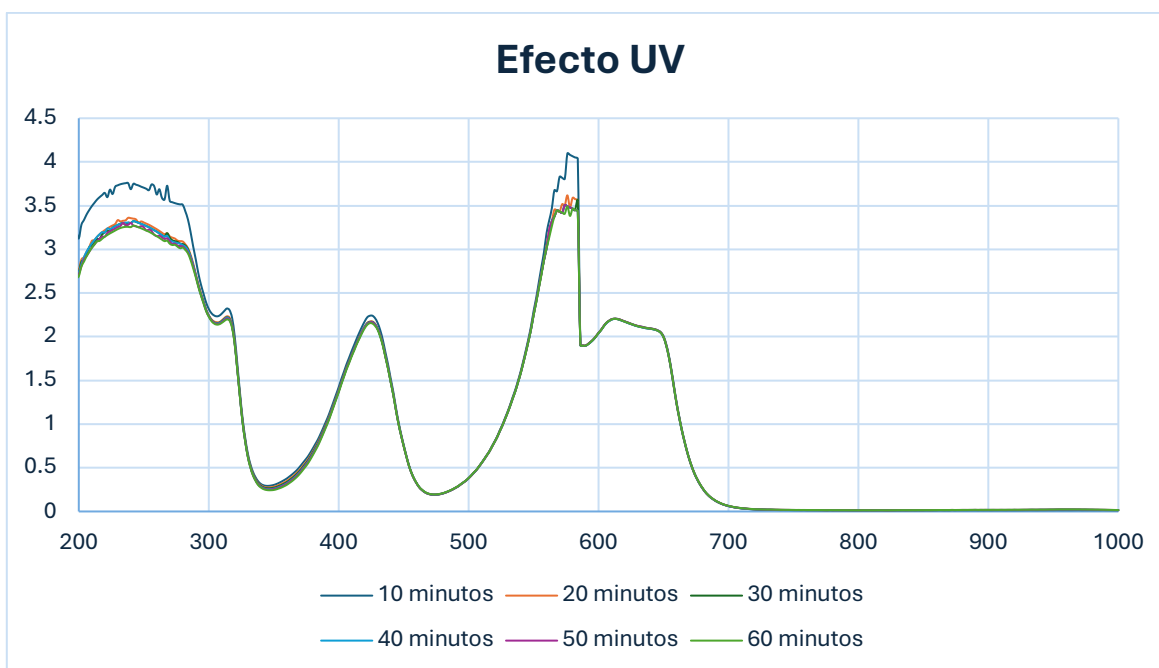


Figura 15 Resultados de degradación de verde malaquita con UV.

Debido a la baja eficiencia del UV reaccionando por si solo, se recomienda el uso de algún agente oxidante que pueda generar radicales $\text{OH}^\bullet$

En la tabla 14 se detallan los parámetros cuantitativos de color (UPC) y pH.

Tabla 14 Parámetros (Color UPC y pH) obtenidos con el uso de UV.

Tiempo	Color (UPC)	pH
0 min	500	4.49
10 min	500	4.32
20 min	500	4.26
30 min	500	4.21
40 min	500	4.15
50 min	500	4.18
60 min	500	4.19

En la figura 16 se puede observar la baja eficiencia arrojada por el tratamiento UV, y coincide de manera cualitativa con los datos arrojados por la tabla anterior.

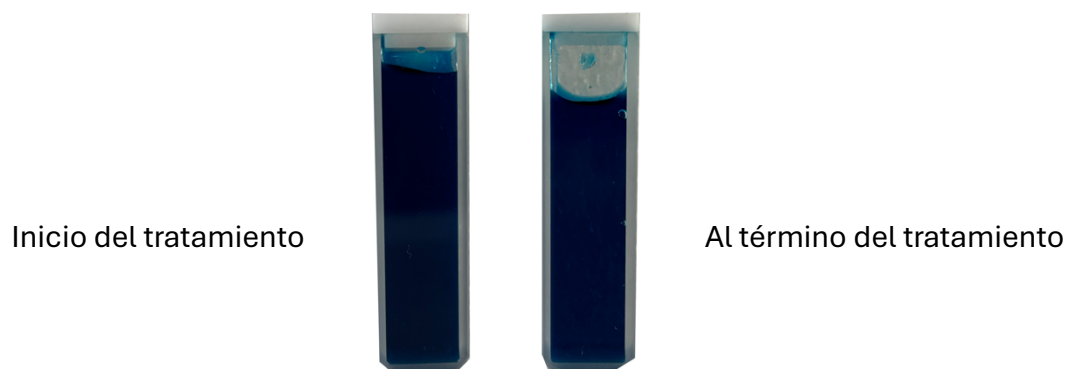


Figura 16 Eficiencia del UV.

Por último, se determinó la cantidad de CO_2 presente.

$$(0.6)(100)=60\text{ppm.}$$

3.4.3 Efecto O₃/H₂O₂

Como se puede apreciar en la figura 13, el ozono (O₃) demuestra ser un agente de oxidación para la degradación del verde malaquita. Por otro lado, en la figura 17 se presenta la degradación utilizando la combinación de O₃/H₂O₂, logrando eficiencias del 98% al emplear 10 ppm de H₂O₂. Sin embargo, el 15 % restante tiende a generar un subproducto.

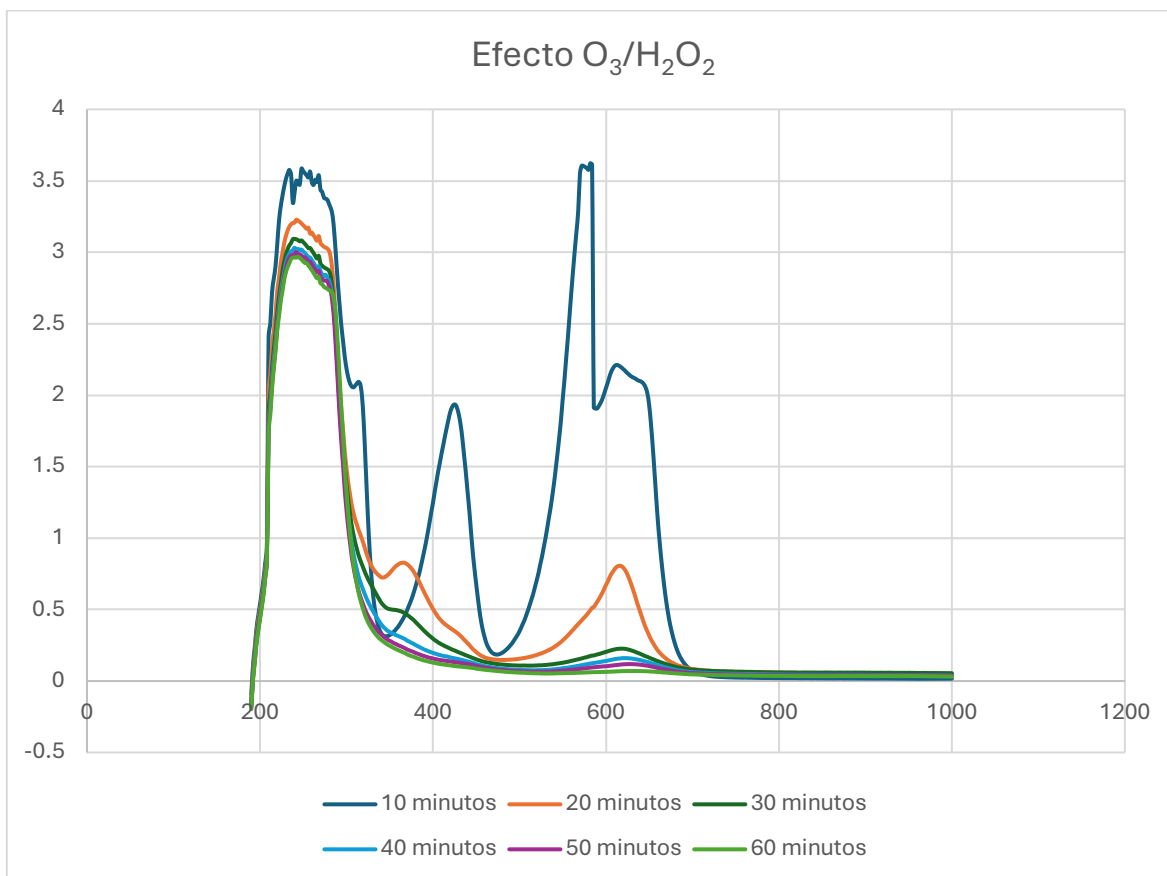
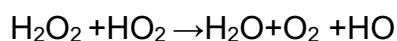
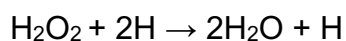


Figura 17 Resultados de la degradación de verde malaquita con O₃/H₂O₂.

La eficiencia del O₃/H₂O₂ se atribuye a la ozonización, debido a que convierte los contaminantes en compuestos más simples y menos reactivos con el reactivo. Se obtiene una mejora al añadir peróxido de hidrógeno (Glaze, 1994). El empleo de dos o más oxidantes en combinación permite aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, lo que resulta en una mayor eliminación de la carga orgánica, según las reacciones siguientes: $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}$



En la tabla 15 se detallan los parámetros cuantitativos de color (UPC) y pH.

Tabla 15 Parámetros de color UPC y pH obtenidos con el método O_3/H_2O_2 .

Tiempo	Color (UPC)	pH
0 min	500	7.48
10 min	490	7.8
20 min	370	7.8
30 min	260	7.69
40 min	255	7.70
50 min	210	7.68
60 min	180	7.65

En la figura 18, se puede notar de forma cualitativa el grado de eficacia de la sinergia de O_3/H_2O_2 , obteniendo resultados aceptables.

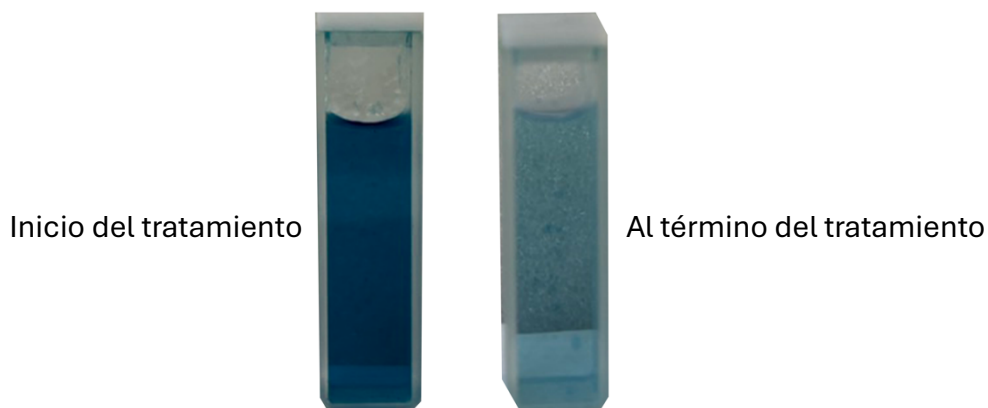


Figura 18 Eficacia del método O_3/H_2O_2

Por último, se determinó la cantidad de CO_2 presente.

$(0.03)(100) = 3$ ppm. Decoloración 64%

3.2.4 Efecto UV/O₃

En La figura 19 se presentan los resultados obtenidos de la degradación del verde malaquita al aplicar los tratamientos UV/O₃ y su combinación. En todos los casos analizados, se observa un aumento en la eficiencia de decoloración a medida que se incrementa el tiempo de tratamiento. Se alcanzaron eficiencias de decoloración de hasta 91.5%.

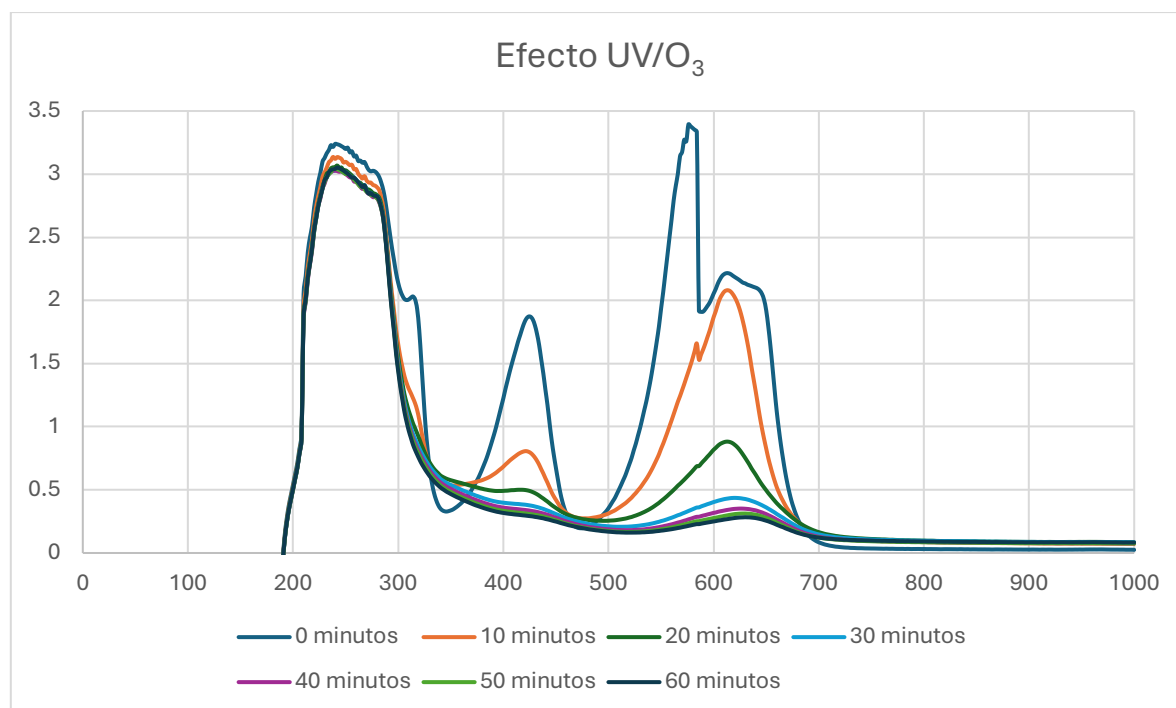
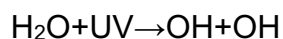


Figura 19 Resultados de degradación obtenidos por el método UV/O₃.

Los resultados se deben a diversos mecanismos cinéticos cuyo objetivo es generar radicales con un alto poder de oxidación, en particular los radicales hidroxilos (OH). Estos radicales, al interactuar con el contaminante, pueden provocar su decoloración, degradación e incluso mineralización. La formación de estas especies químicas depende del método de tratamiento utilizado. En el caso específico de la radiación UV, la generación de radicales OH se produce mediante la fotólisis del agua. Sin embargo, algunos autores (Moctezuma et al., 2016) han señalado que esta reacción es lenta, por lo que para lograr altas eficiencias de decoloración se requieren tiempos de tratamiento largos. Este efecto se observó en los resultados obtenidos, alcanzando eficiencias de hasta el 85% en 60 minutos de tratamiento.



Por otro lado, la vía indirecta implica la descomposición del ozono al interactuar con el agua, lo que genera radicales hidroxilos, los cuales tienen una alta reactividad y no son selectivos, además de otras especies oxidantes que favorecen el proceso de decoloración.

En la tabla 16 se detallan los parámetros cuantitativos de color obtenidos en la aplicación del método UV/O₃ (UPC) y pH.

Tabla 16 Parámetros de color UPC y pH obtenidos con el método UV/O₃.

Tiempo	Color (UPC)	pH
0 min	500	7.3
10 min	460	6.71
20 min	400	6.70
30 min	315	6.70
40 min	260	6.70
50 min	200	6.70
60 min	160	6.68

En la figura 18, se puede notar de forma cualitativa el grado de eficacia de la sinergia de O₃/H₂O₂, obteniendo resultados aceptables.

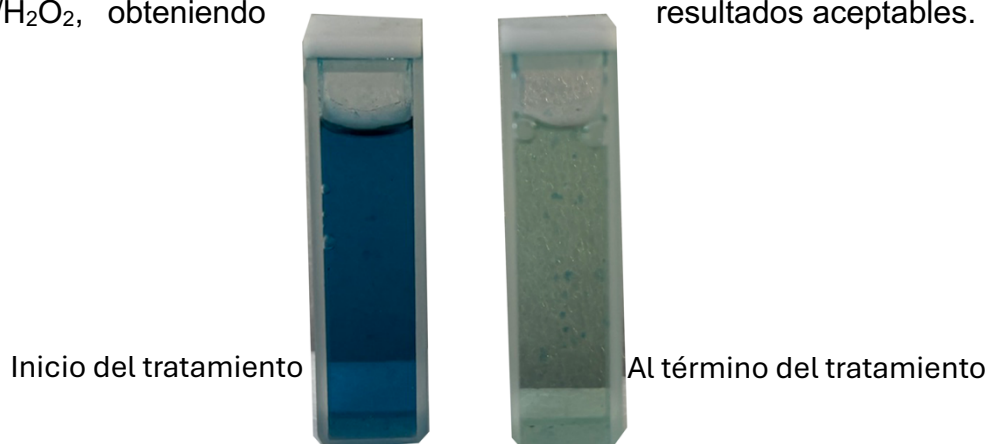


Figura 20 Eficacia del método O₃/UV

Por último, se determinó la cantidad de CO₂ presente.

(0.07)(100)= 7 ppm. Decoloracion 68%

3.2.5 Efecto UV/O₃/H₂O₂

Se efectuó un estudio sinérgico utilizando O₃/UV/H₂O₂ con una concentración de 10 ppm de peróxido de hidrógeno, como se puede apreciar en la figura 16, desde los primeros 10 minutos se notó un efecto significativo en la degradación en un 95 q99.5%, una vez terminado el proceso, se cuantifico una eficacia del 99.7%.

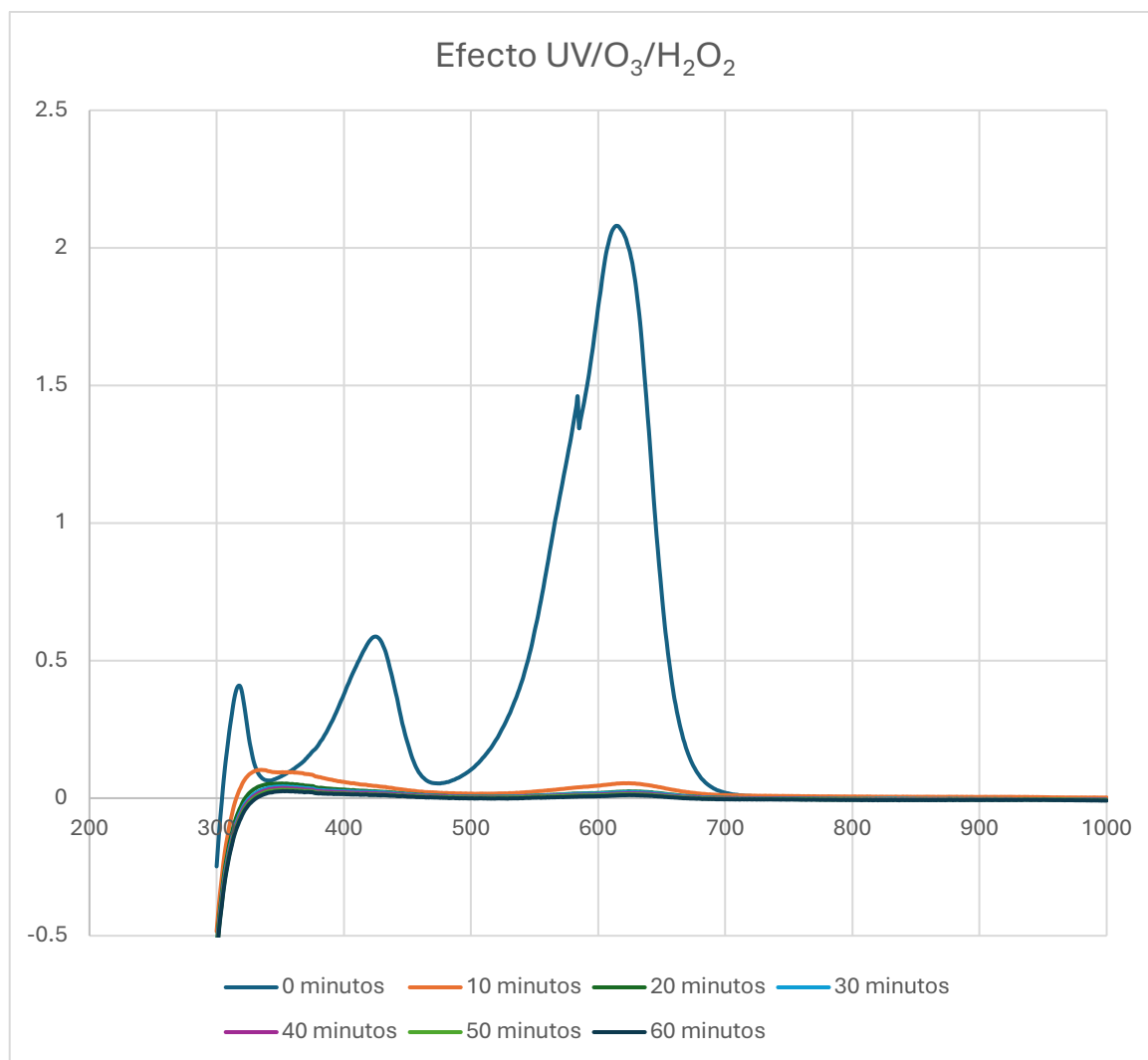


Figura 21 Degradación obtenida por el método UV/O₃/ H₂O₂

En la tabla 17 se muestran los distintos parámetros obtenidos (color y pH) obtenidos en las muestras recolectadas en cada intervalo de tiempo de 10 minutos. Cabe mencionar que se utilizó un colorímetro con unidades platino cobalto (UPC), y un pHmetro eléctrico.

Tabla 17 Parámetros (Color UPC y PH) obtenidos con el uso de UV/O₃/H₂O₂.

Tiempo	Color (UPC)	pH
0 min	500	4.40
10 min	110	6.23
20 min	60	6.50
30 min	50	6.56
40 min	45	6.58
50 min	25	6.60
60 min	25	6.60

De manera cualitativa y cuantitativamente podemos determinar que este método fue el más eficaz en cuanto a tiempo y porcentaje de degradación del verde malaquita, en la figura 17, se puede notar de forma cualitativa el grado de eficacia de la sinergia de UV/O₃/H₂O₂, obteniendo resultados favorables en cuanto a tiempo y costos

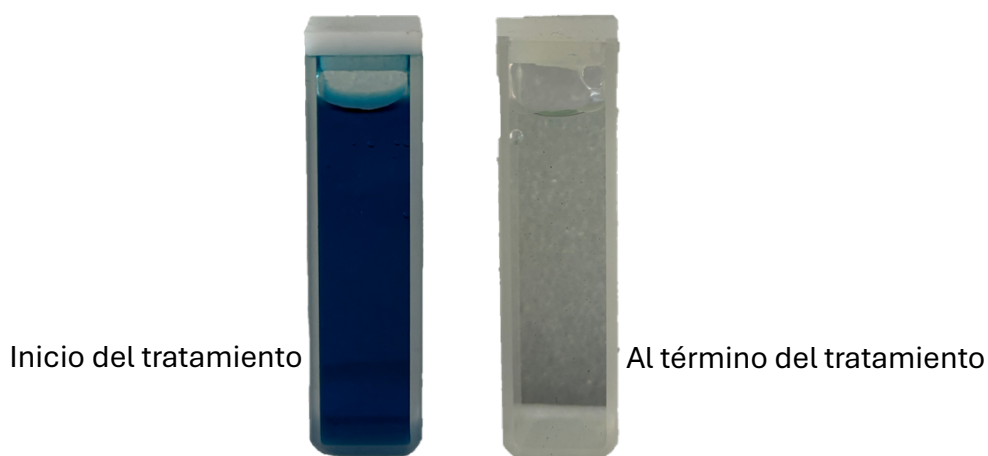


Figura 22 Decoloración obtenida en la aplicación del UV/O₃/H₂O₂

Conclusiones

Con base en los resultados derivados de la aplicación de técnicas de oxidación avanzada para la eliminación del contaminante emergente Verde malaquita, se observa una variación en los porcentajes de decoloración. Esta variabilidad se atribuye a las características de los compuestos, que presentan un elevado peso molecular y diversos grupos funcionales no susceptibles de degradación mediante los métodos utilizados, lo que resulta en una eficacia reducida. En la Tabla 18 se muestran los mejores resultados al emplear la combinación de dos agentes oxidantes en comparación con la aplicación de un solo agente.

Tabla 18 Resultados obtenidos clasificándolos de forma notable o óptima según el método.

Contaminante	Resultado	Método	% Decoloración
Verde malaquita	Notable	O ₃	68%
	Notable	H ₂ O ₂ /O ₃	85%
	Optimo	H ₂ O ₂ /O ₃ /UV	95%

En el caso del H₂O₂/O₃ mostró una buena efectividad arrojando resultados positivos, sin embargo, el agente oxidante no tenía la suficiente concentración para promover un efecto inhibitorio en la decoloración de los contaminantes en estudio ya que en vez de actuar sobre el contaminante actuaba sobre los radicales, provocando un descenso en la efectividad.

La aplicación de ozono (O₃) resulta en una evidente alteración del color, manifestándose en tonalidades amarillentas. Este fenómeno se atribuye a la relativa lentitud en la velocidad de reacción del ozono, lo que conduce a la formación de subproductos. Se observa que, a pesar de que la descomposición significativa del verde malaquita con ozono requiere un contacto prolongado, este proceso tiende a generar subproductos no deseados.

La combinación de O₃/UV/H₂O₂ presentó una alta efectividad para la decoloración de contaminantes emergentes de diversas industrias, que poseen compuestos

recalcitrantes, ya que en conjunto se obtuvieron eficiencias altas y de gran significancia.

El reactor de tratamiento resulto adecuado para el tratamiento de los contaminantes, por lo que se pueden efectuar más estudios con distintos contaminantes.

Los procesos de oxidación avanzada surgen como una opción práctica para la eliminación del color de contaminantes emergentes, especialmente en el caso de los colorantes analizados. Aunque estos colorantes poseen diversas características, se logró una decoloración aceptable. Para mejorar aún más los resultados, es esencial determinar las concentraciones óptimas de $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ que maximicen la eficacia de la decoloración.

Recomendaciones

Se sugiere realizar pruebas que involucren el aumento de la concentración del agente oxidante en algunos casos, con el objetivo de alcanzar eficiencias cercanas al 100%. Además, se plantea la posibilidad de explorar otros métodos de tratamiento, como los procesos heterogéneos.

Es imperativo optimizar el método de $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$, ya sea de manera individual o en combinación. En el caso de la radiación UV, se propone aumentar la potencia de la lámpara o incluso agregar otra lámpara. También se sugiere considerar la posibilidad de prolongar el tiempo de tratamiento, dado que el tiempo propuesto fue de una hora, obteniendo resultados óptimos, superiores al 90%. Otra opción sería la incorporación de una concentración y volumen, para reducir el tiempo de tratamiento.

En cuanto al reactor utilizado para la fotocatalisis, se hace hincapié en la necesidad de optimizarlo. La presencia de coloración en las mangueras puede presentar una variación de efectividad y pueden estar vinculadas a una homogenización insuficiente. Se sugiere realizar un análisis en relación con la introducción del oxidante para determinar el momento adecuado para su incorporación.

Experiencia profesional adquirida.

Tener la capacidad para analizar problemáticas y brindar y/o proponer soluciones a problemáticas de contaminación ambiental, como la propia contaminación del agua, misma que pese a las regulaciones ambientales existentes, no siempre son aplicadas de manera adecuada, o no aplicadas.

Es por ello que parte del proceso de este trabajo, pude adquirir habilidades que contribuyeron a mi crecimiento personal, académico y profesional.

En primer lugar, pude ampliar mi panorama ante las nuevas tecnologías de tratamiento de agua, que, sin duda, toma un papel importante en el estudio de Ingeniería Ambiental, debido a que es un área de oportunidad favorable respecto a la solución de problemas ambientales y el campo laboral que personas dedicadas a esta disciplina podemos ejercer.

Durante la realización de este proyecto pude mejorar mi capacidad de análisis y toma de decisiones, además tuve la oportunidad de conocer y aplicar métodos de oxidación avanzada, técnicas de medición, análisis y grafico de datos que son indispensables en el quehacer científico.

Por otro lado, el contacto con Personal Docente, así como de estudiantes tuvo relevancia en el desarrollo de este trabajo, fortaleciendo mis capacidades sociales, trabajo en equipo y de comunicación. Se fomentó mi aprendizaje continuo en cuanto a fundamentos teóricos y la aplicación de proyectos afines en el mejoramiento del medio ambiente, adicionalmente, pude comprender temas relacionados a otras áreas de investigación que pueden complementar en desarrollo de este proyecto.

[OBJ]

Competencias desarrolladas y/o aplicadas.

En la siguiente tabla se exhiben las diferentes materias que apoyaron como guía en la elaboración y ejecución de este proyecto, mismas que forman parte de la retícula de la carrera de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, estas formaron parte del seguimiento de temas de interés a lo largo de la realización de este reporte de residencia

Asignatura	Competencia específica	Aplicación de la competencia
Fundamentos de investigación	Capacidad de gestionar la información para realizar una investigación documental, sobre un tema estrechamente relacionado con su campo profesional.	La competencia llevada a cabo consistió en la búsqueda de información en diversas fuentes bibliográficas para la elaboración del informe de residencia, abarcando los periodos previos, durante y posterior al mismo.
Taller de investigación I	Búsqueda y clasificación de los diferentes tipos de investigación en el área de investigación y estructurar un protocolo de investigación de forma adecuada.	La competencia se llevó a cabo mediante la realización de una investigación gestionada con el objetivo de elaborar un documento que abarcara los aspectos más relevantes y resultara útil.
Taller de investigación II	Consolida un protocolo para ejecutar la investigación y obtener productos para su exposición, defensa y gestión de trascendencia.	El progreso ofrece en esta competencia se tradujo en la creación de un documento que Soluciones a problemáticas específicas, abordando de manera integral todos los aspectos necesarios.

Fuentes de Información

Real Academia Española, Diccionario de la lengua española, 22ª edición, Madrid, 2001.

Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2004). "Principles of Biochemistry." Editorial.

Daughton, C.G., Ternes, T.A., (1999) Pharmaceuticals and personal care products in the environment; Agents of subtle change. Environ., Health Persp., 107, 907-938.

McQuarrie, D. A., & Simon, J. D. (2006). Physical Chemistry: A Molecular Approach. University Science Books.5

Tejero, I. (2006). Detention Storage Volume for Combined Sewer Overflow into a River. Environmental Technology, 23, 663-675.

Root, P., Hunt, M., Fjeld, K., & Kundrat, L. (2014). Microbiological water methods: quality control measures for Federal Clean Water Act and Safe Drinking Water Act regulatory compliance. PubMed.

Larrea, M. (2012). Gestión del Conocimiento y la Institución Universitaria, Una Visión Aupoiética. ARJÉ: Revista de Postgrado, 6, 43-47

International Water Management Institute. (2000). Global Water Outlook to 2025. Arrazcaeta, O., (2002) Contaminación de las aguas por plaguicidasquímicos. Fitosanidad, 3 septiembre, 6(3), p. 9.

Barceló, L. D., & López de Alda, M. J. (2008). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales-CSIC (Barcelona).

Pignatello, J.J., Oliveros, E., MacKay, A. (2006). Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.

Stuart, M., Lapworth, D., Crane, E., Hart, A. 2012. Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. Science of The Total Environment.

Kümmerer K. (2001). Drugs in the environment: emission of drugs, diagnostic aids and disinfectants into wastewater by hospitals in relation to other sources.

Bae S.J., Freeman S.H., Kim D.S., (2005). Influences of new azo dyes to the aquatic ecosystem. Fiber Polymer., 7, 30-35.

Anjaneyulu Y., Sreedhara-Chary N., Suman-Raj S., (2005). Decolourization of industrial effluents – available methods and emerging technologies – a review. Rev. Environ. Sci. Technol., 4, 245–273.

Legrini, O, Oliveros E., Braun, A.M. (1993), Photochemical processes for water treatment, Chemical Rev, 93, 671-698.

Huang, C.P., Dong, Ch., Tang, Z. (1993), Advanced chemical oxidation: Its present role and potential future in hazardous waste treatment., Waste management, 13, 361-377.

Fernández-Alba, A.R., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., Sanz J.M. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales, Cap. 2, 30- 43.