

Remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos mediante un proceso de oxidación avanzada en las aguas residuales provenientes de un centro hospitalario de Popayán, Cauca.

Ana María Rozo Hernández
Yennifer Yineth Otero Molano



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible
Programa de Ingeniería Ambiental y de Saneamiento
Popayán – Cauca

2026

Remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos mediante un proceso de oxidación avanzada en las aguas residuales provenientes de un centro hospitalario de Popayán, Cauca.

Ana María Rozo Hernández
Yennifer Yineth Otero Molano

Trabajo de Grado modalidad Investigación para optar el título profesional de Ingeniero
Ambiental y Sanitario

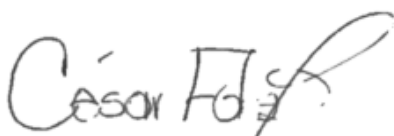
Director
César Fernández Morantes
Codirector
Edwin Fernando Sierra Gaviria



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible
Programa de Ingeniería Ambiental y de Saneamiento
Popayán – Cauca
2026

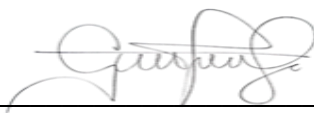
Nota de Aceptación

Una vez revisado y aprobado el documento final del trabajo de grado titulado *Remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos mediante un proceso de oxidación avanzada en las aguas residuales provenientes de un centro hospitalario de Popayán, Cauca*, realizado por las estudiantes Ana María Rozo Hernández y Yennifer Yineth Otero Molano, se autoriza para optar el título de profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



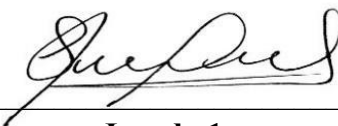
Director.

César Fernández Morantes



Codirector.

Edwin Fernando Sierra Gaviria



Jurado 1.

Juan Pablo Prado Medina



Jurado 2.

Arnol Arias Hoyos

Popayán, 2026

Dedicatoria

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios, por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida, por darme fortaleza, sabiduría y la valentía necesaria para superar cada obstáculo presentado durante este proceso académico. A mis padres, quienes han sido el mayor apoyo y la inspiración más grande en mi vida. Gracias por cada sacrificio, por cada consejo, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por impulsarme siempre a seguir adelante para alcanzar mis sueños, a mis hermanos, y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, estuvieron presentes acompañándome, brindándome ánimo, apoyo y palabras de aliento en cada etapa de este camino. De manera especial, dedico este logro a mis docentes, quienes estuvieron conmigo durante todo mi proceso académico, compartiendo sus conocimientos, experiencias y enseñanzas. Gracias por su paciencia, dedicación y apoyo constante, porque cada aprendizaje recibido contribuyó significativamente a mi crecimiento profesional y personal. Este logro también es de ustedes.

Ana María Rozo Hernández

Primeramente, agradezco a Dios por brindarme la sabiduría necesaria para concluir una de las etapas más importantes de mi vida profesional, por iluminar mi camino y permitirme alcanzar esta meta. A mis padres por su amor y el esfuerzo dedicado, este logro no habría sido posible sin sus consejos, sacrificios y especialmente el apoyo incondicional, fueron mi más grande motivo, impulsándome a seguir adelante y nunca rendirme. Agradezco a mi hermana por creer en mí incluso cuando yo dudaba, este logro no es solo mío, también es de ustedes, porque son la razón de muchos de mis sueños cumplidos. A la universidad por brindarme espacios adecuados para el desarrollo académico y a mis docentes que con su empeño y dedicación me brindaron lo mejor de sus conocimientos, fomentando en mí el amor por mi carrera y el deseo de ser la mejor en mi profesión. Agradezco de manera especial a una persona muy importante en mi vida, por su apoyo, compañía y palabras de ánimo durante este proceso académico. Gracias por estar presente en los momentos difíciles, por motivarme a seguir adelante y por brindarme tranquilidad y confianza cuando más lo necesité, tu acompañamiento fue una parte significativa de este logro y siempre lo llevaré con gratitud en mi corazón.

Yennifer Yinet Otero Molano

Agradecimientos

Agradecemos principalmente a Dios, por habernos brindado la vida, la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para llegar hasta este momento tan importante y culminar satisfactoriamente nuestro proceso académico. Gracias por guiarnos en cada paso, por darnos la capacidad de superar las dificultades y por permitirnos cumplir una meta que representa el fruto de años de esfuerzo, dedicación y sacrificio.

A nuestros padres, quienes han sido el apoyo más grande e incondicional durante toda nuestra vida y especialmente a lo largo de esta etapa universitaria. Gracias por cada sacrificio realizado, por cada palabra de aliento en los momentos difíciles, por creer siempre en nosotras y motivarnos a seguir adelante aun cuando el camino parecía complicado. Este logro también es suyo, porque sin su amor, esfuerzo y compañía nada de esto habría sido posible.

A nuestras familias y seres queridos, quienes estuvieron presentes brindándonos apoyo, comprensión y ánimo durante todo este proceso. Gracias por acompañarnos en cada etapa, por su paciencia y por impulsarnos siempre a luchar por nuestros sueños.

Expresamos un agradecimiento muy especial a nuestros docentes, quienes hicieron parte fundamental de nuestra formación profesional y personal. Principalmente a los docentes César Fernández, Edwin Sierra y Arnol Arias, por habernos apoyado desde el inicio de este proceso, por compartir con nosotros sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, y por guiarnos con dedicación, paciencia y compromiso en cada etapa de nuestra formación académica. Gracias por creer en nuestras capacidades, por acompañarnos constantemente y por motivarnos a dar siempre lo mejor de nosotros.

Asimismo, agradecemos a la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca por abrirnos sus puertas y brindarnos la oportunidad de formarnos profesionalmente, permitiéndonos crecer no solo en el ámbito académico, sino también como personas comprometidas con nuestro futuro y con la sociedad.

Finalmente, agradecemos a todas aquellas personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este camino y contribuyeron a que hoy pudiéramos alcanzar esta meta tan significativa en nuestras vidas.

Tabla de contenido

Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción	13
Capítulo 1. Problema de Investigación	15
1.1. Planteamiento del problema	15
1.2. Justificación.....	16
1.3. Objetivos 17	
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
Capítulo 2. Marco teórico o referentes conceptuales.....	18
2.1. Antecedentes	18
2.2. Marco conceptual o teórico	20
2.3. Bases legales	21
Capítulo 3. Metodología	24
3.1. Fase 1. Determinación de la concentración de contaminantes emergentes de mayor uso en un centro hospitalario de Popayán, Cauca.....	24
3.1.1. Actividad 1. Visita de campo	24
3.1.2. Actividad 2. Muestreo	25
3.1.3. Actividad 3. Caracterización de los contaminantes emergentes del agua residual	27
3.2. Fase 2. Diseño de un sistema de tratamiento no convencional para la degradación de contaminantes	28
3.2.1. Actividad 1. Revisión bibliográfica para la selección de la tecnología de tratamiento	28
3.2.2. Actividad 2. Dimensionamiento del prototipo del sistema de tratamiento	30
3.2.3. Actividad 3. Construcción y puesta en marcha del sistema	31
3.3. Fase 3. Estimación de la eficacia del sistema de oxidación avanzada para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos	31
3.3.1. Actividad 1. Diseño experimental	31
3.3.2. Actividad 2. Cuantificación de los contaminantes emergentes farmacéuticos.....	32
3.3.3. Actividad 3. Pruebas de remoción en el prototipo	32
3.3.4. Actividad 4. Análisis de la información	33
Capítulo 4. Resultados y Discusión.....	34

4.1. Fase 1. Determinación de la concentración de contaminantes emergentes de mayor uso en un centro hospitalario de Popayán, Cauca.....	34
4.1.1. Actividad 1. Visita de campo	34
4.1.2. Actividad 2. Resultados de la caracterización fisicoquímica	37
4.1.3. Actividad 3. Caracterización de contaminantes emergentes del agua residual	41
4.2. Fase 2. Diseño de un sistema de tratamiento no convencional para la degradación de contaminantes	44
4.2.1. Actividad 1. Revisión bibliográfica para la selección de la tecnología de tratamiento	44
4.2.2. Actividad 2. Dimensionamiento del prototipo del sistema de tratamiento	50
4.2.3. Actividad 3. Construcción y puesta en marcha del sistema	52
4.3. Fase 3. Estimación de la eficacia del sistema de oxidación avanzada para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos de mayor uso.....	55
4.3.1. Actividad 1. Diseño experimental	55
4.3.2. Actividad 2. Cuantificación de los CEF	69
4.3.3. Actividad 3. Pruebas de remoción en el prototipo	71
4.3.4. Actividad 4. Análisis de la información	72
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.....	74
5.1. Conclusiones	74
5.2. Recomendaciones.....	74
Referencias.....	76
Anexos	85

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros y equipos utilizados en muestreo Ex situ e In situ	27
Tabla 2. Definición de ítems para la ejecución de la revisión sistemática.....	28
Tabla 3 Categorías y subcategorías de análisis.....	29
Tabla 4 Resultados de la caracterización fisicoquímica in-situ y ex-situ de las ARH.....	38
Tabla 5 Resultados de los CEF obtenidos en muestras de agua enviadas al laboratorio de la UIS.	42
Tabla 6 Dimensiones del prototipo.	51
Tabla 7 Niveles y factores utilizados para el diseño experimental.	56
Tabla 8 Diseño experimental del POA Foto-fenton con TML.	57
Tabla 9 Diseño experimental del POA Foto-fenton con ACETA.	63

Lista de figuras

Figura 1. Recolección de las muestras durante un periodo de 12 horas.	25
Figura 2. Hospital Susana López de Valencia	36
Figura 3. Ubicación de la caja de inspección (Punto de muestreo) del sistema de ARH del Hospital Susana López de Valencia.....	37
Figura 4. Resultados de la revisión bibliográfica para la selección de la tecnología de tratamiento	45
Figura 5. Tecnologías identificadas de los POA.....	46
Figura 6. Tipos de CEF tratados mediante POA	47
Figura 7. Eficiencias de remoción encontradas dentro de los estudios POA	48
Figura 8. Planos del diseño del reactor tipo foto-fenton a 3 caras (frontal, plana y lateral)...	51
Figura 9. Collage de la estructura del reactor donde se evidencia completo, parte inferior y superior	52
Figura 10. Estructura del metal como soporte del reactor	53
Figura 11. Motor eléctrico monofásico como sistema de agitación	54
Figura 12. Lampara UV/VIS CON 13W adaptada en la parte inferior del sistema	54
Figura 13. Prototipo terminado.....	55
Figura 14. Interacción de Fe: H ₂ O ₂ en niveles de tiempo con TML en solución acuosa.	59
Figura 15. Interacción de Fe: H ₂ O ₂ en niveles de tiempo con TML en solución acuosa	60
Figura 16. Gráfico de contorno del porcentaje de degradación (%DEG) en función de la concentración de hierro a 90 minutos de reacción.....	61
Figura 17. Superficie de respuesta del porcentaje de degradación (%DEG) del proceso Foto-Fenton a un tiempo de reacción de 90 min.	62
Figura 18. Interacción de Fe: H ₂ O ₂ en niveles de tiempo con ACETA en solución acuosa...	64
Figura 19. Contorno de %DEG a t=90 min Interacción de Fe: H ₂ O ₂ con ACETA en solución acuosa.....	66
Figura 20. Superficie de respuesta del porcentaje de degradación (%DEG) del proceso Foto-Fenton a un tiempo de reacción de 90 min.	68
Figura 21. Montaje experimental del proceso de oxidación avanzada tipo foto-fenton aplicado a la degradación de tramadol en solución acuosa, mostrando además el sistema de agitación	72

Lista de anexos

Anexo 1. Equipo de trabajo durante la actividad de muestreo en campo, responsable de la recolección y manejo de muestras para su posterior análisis en laboratorio.	85
Anexo 2. Toma de muestras de agua residual en campo, mediante recolección directa en punto de descarga, para su posterior análisis físicoquímico.	85
Anexo 3. Preparación de soluciones en laboratorio utilizando material volumétrico para el desarrollo del análisis experimental.....	86
Anexo 4. Ficha técnica de TML	86
Anexo 5. Ampolleta de TML utilizada durante los ensayos de remoción en prototipo.	86
Anexo 6. Ficha técnica de ACETA	87
Anexo 7. Figura del ACETA utilizado durante los ensayos de remoción en prototipo.	87

Resumen

Las aguas residuales hospitalarias (ARH) constituyen una de las principales fuentes de liberación de contaminantes emergentes farmacéuticos (CEF) al ambiente debido a la presencia de compuestos de difícil degradación y elevadas cargas orgánicas e iónicas. En la presente investigación se evaluó la eficiencia de un proceso de oxidación avanzada tipo foto-Fenton para la degradación de tramadol (TML) y acetaminofén (ACETA) presentes en las aguas residuales de un centro hospitalario ubicado en Popayán, Cauca.

Para el desarrollo del estudio se implementó un diseño experimental factorial 3^3 , mediante el cual se evaluó la influencia de la concentración de hierro (Fe^{2+}), la concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el tiempo de reacción sobre el porcentaje de degradación de los contaminantes seleccionados. Previamente, se realizó la caracterización fisicoquímica del agua residual, evidenciando una matriz compleja con elevadas concentraciones de materia orgánica y sólidos suspendidos. Asimismo, mediante análisis por UHPLC-ESI(+)-Orbitrap-HRMS se identificaron diferentes contaminantes farmacéuticos presentes en las muestras analizadas.

Los resultados experimentales evidenciaron que el proceso foto-Fenton presentó un comportamiento dependiente de las condiciones de operación. Para el tramadol se obtuvo una degradación máxima cercana al 71,8 %, mientras que para el acetaminofén se alcanzaron eficiencias superiores al 80 % bajo las condiciones óptimas evaluadas. Estos resultados demuestran el potencial de esta tecnología para la degradación de contaminantes farmacéuticos presentes en aguas residuales hospitalarias.

En conclusión, el proceso foto-Fenton constituye una alternativa eficiente para el tratamiento de este tipo de efluentes, aportando información que puede servir como base para futuras investigaciones orientadas al diseño y escalamiento de tecnologías destinadas a la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos.

Palabras clave: proceso foto-Fenton, contaminantes emergentes farmacéuticos, aguas residuales hospitalarias, tramadol, acetaminofén.

Abstract

Hospital wastewater (HWW) is considered one of the main sources of emerging pharmaceutical contaminants (EPCs) due to the presence of persistent compounds associated with high organic and inorganic loads. This study evaluated the efficiency of a photo-Fenton advanced oxidation process for the degradation of tramadol (TML) and acetaminophen (ACETA) present in wastewater from a hospital located in Popayán, Cauca.

A 3³ factorial experimental design was applied to assess the influence of ferrous ion concentration (Fe^{2+}), hydrogen peroxide (H_2O_2) concentration, and reaction time on the degradation efficiency of the selected pharmaceutical compounds. Prior to the experimental stage, the wastewater was physicochemically characterized, revealing a complex matrix with high organic matter and suspended solids content. In addition, UHPLC-ESI(+)-Orbitrap-HRMS analysis confirmed the presence of several pharmaceutical contaminants in the collected samples.

The experimental results demonstrated that the photo-Fenton process achieved a maximum degradation efficiency of approximately 71.8% for tramadol and values above 80% for acetaminophen under the optimal operating conditions. These findings highlight the potential of the photo-Fenton process as an effective alternative for the treatment of hospital wastewater containing pharmaceutical contaminants.

Overall, this study provides scientific evidence supporting the application of advanced oxidation processes for the removal of emerging pharmaceutical contaminants and contributes valuable information for future optimization and scale-up of hospital wastewater treatment technologies.

Keywords: photo-Fenton process, emerging pharmaceutical contaminants, hospital wastewater, tramadol, acetaminophen.

Introducción

En las últimas décadas, la presencia de contaminantes emergentes (CE) en los recursos hídricos ha adquirido una creciente relevancia debido a los posibles efectos que estos compuestos pueden generar sobre los ecosistemas y la salud humana. Entre ellos, los contaminantes emergentes farmacéuticos (CEF) representan uno de los grupos de mayor interés, ya que su uso continuo en la medicina humana y veterinaria ha favorecido su incorporación permanente al ambiente. Debido a su persistencia y a la limitada eficiencia de los tratamientos convencionales para eliminarlos, estos compuestos han sido detectados en aguas superficiales, subterráneas e incluso en efluentes de plantas de tratamiento, generalmente en concentraciones del orden de nanogramos y microgramos por litro [1].

La liberación de contaminantes farmacéuticos al medio ambiente ocurre principalmente a través de la excreción de medicamentos que no son metabolizados completamente por el organismo. No obstante, también intervienen otras fuentes, como la disposición inadecuada de medicamentos vencidos, los vertimientos procedentes de instituciones hospitalarias, las descargas de la industria farmacéutica y las actividades veterinarias. En conjunto, estas vías favorecen el ingreso continuo de estos compuestos a los sistemas de alcantarillado y posteriormente a las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde muchos de ellos permanecen debido a que los procesos convencionales no fueron diseñados para remover este tipo de sustancias [2].

Las aguas residuales hospitalarias (ARH) constituyen una de las principales fuentes de emisión de contaminantes farmacéuticos, ya que concentran una amplia variedad de principios activos utilizados durante la atención médica, entre ellos analgésicos, antibióticos, antiinflamatorios y otros compuestos de uso terapéutico. Además, este tipo de efluentes presenta elevadas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, microorganismos patógenos y diversas sustancias químicas que incrementan la complejidad de su tratamiento. Esta condición evidencia la necesidad de implementar tecnologías que permitan degradar eficientemente compuestos recalcitrantes antes de su descarga al ambiente [3].

En respuesta a esta problemática, los procesos de oxidación avanzada (POA) han despertado un creciente interés debido a su capacidad para generar radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), especies altamente reactivas capaces de oxidar una amplia variedad de contaminantes orgánicos persistentes. Entre estas tecnologías, el proceso foto-Fenton se ha consolidado como una alternativa prometedora gracias a su elevada eficiencia de degradación, relativa facilidad

de implementación y potencial aplicación en el tratamiento de aguas residuales hospitalarias contaminadas con compuestos farmacéuticos.

A pesar de los avances alcanzados en este campo, aún existen desafíos relacionados con la optimización de las condiciones de operación y la evaluación de tecnologías capaces de remover eficientemente contaminantes farmacéuticos presentes en aguas residuales hospitalarias. En este contexto, la presente investigación evaluó la aplicación de un proceso de oxidación avanzada tipo foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales provenientes de un centro hospitalario de Popayán, Cauca. Con base en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué proceso de oxidación avanzada presenta la mayor eficiencia para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos presentes en las aguas residuales de un centro hospitalario de Popayán, Cauca?

Capítulo 1. Problema de Investigación

1.1. Planteamiento del problema

Los contaminantes emergentes (CE) comprenden un conjunto de sustancias químicas cuya presencia en el ambiente ha despertado un creciente interés debido a los efectos que pueden generar sobre los ecosistemas y la salud humana. Dentro de este grupo, los contaminantes emergentes farmacéuticos (CEF) representan una problemática relevante, ya que su uso continuo en los sectores hospitalario, doméstico y veterinario favorece su incorporación permanente a las fuentes hídricas [4].

Las aguas residuales hospitalarias (ARH) constituyen una de las principales vías de ingreso de estos compuestos al ambiente. Se estima que entre el 30 % y el 90 % de los principios activos administrados son excretados sin metabolizar completamente, permitiendo que alcancen los sistemas de alcantarillado y posteriormente las plantas de tratamiento de aguas residuales. No obstante, los tratamientos convencionales fueron diseñados principalmente para remover materia orgánica biodegradable, por lo que presentan una eficiencia limitada frente a contaminantes farmacéuticos persistentes [5].

La permanencia de los CEF en los ecosistemas acuáticos representa un riesgo ambiental debido a su capacidad para alterar procesos biológicos en diferentes organismos. Diversos estudios han reportado efectos relacionados con alteraciones en el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de especies acuáticas, además de favorecer el desarrollo de resistencia antimicrobiana y otros impactos asociados a la exposición continua de estos compuestos [6], [7].

En el Hospital Susana López de Valencia, las aguas residuales son descargadas al sistema de alcantarillado sin un tratamiento específico orientado a la eliminación de contaminantes farmacéuticos, debido a la ausencia de una planta destinada a este tipo de efluentes. Esta condición facilita el transporte de estos compuestos hacia los cuerpos de agua receptores, incrementando la necesidad de implementar alternativas de tratamiento más eficientes [8].

Aunque existen diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, muchas presentan limitaciones cuando se aplican a contaminantes farmacéuticos recalcitrantes. Los procesos biológicos convencionales ofrecen buenos resultados para la remoción de materia orgánica biodegradable; sin embargo, su eficiencia disminuye frente a este tipo de compuestos.

Por otra parte, tecnologías como la nanofiltración y la ósmosis inversa logran elevadas eficiencias de remoción, pero requieren altos costos de operación y generan corrientes residuales que demandan tratamientos adicionales [9].

Frente a esta problemática, resulta necesario evaluar tecnologías capaces de degradar eficientemente los contaminantes emergentes farmacéuticos presentes en las aguas residuales hospitalarias. En consecuencia, esta investigación propone evaluar un proceso de oxidación avanzada tipo foto-Fenton como alternativa para la remoción de dichos compuestos, aportando información para el desarrollo de estrategias de tratamiento ambientalmente sostenibles.

1.2. Justificación

La presencia de contaminantes emergentes farmacéuticos en las aguas residuales hospitalarias representa un desafío para la gestión ambiental debido a su persistencia y a la limitada capacidad de los sistemas convencionales para eliminarlos. Esta situación ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a evaluar tecnologías que permitan reducir la carga contaminante antes de su descarga al ambiente.

En este contexto, la presente investigación analiza la aplicación de un proceso de oxidación avanzada tipo foto-Fenton como alternativa para la degradación de contaminantes farmacéuticos presentes en aguas residuales hospitalarias. Los resultados obtenidos aportan evidencia sobre el comportamiento de esta tecnología bajo diferentes condiciones de operación y constituyen un referente para futuras investigaciones relacionadas con el tratamiento de este tipo de efluentes.

Desde la perspectiva ambiental, el estudio contribuye a la búsqueda de soluciones que favorezcan la disminución de contaminantes emergentes en los cuerpos de agua, promoviendo la protección de los ecosistemas acuáticos y el uso sostenible del recurso hídrico. Asimismo, la información generada puede servir como soporte para el diseño y optimización de sistemas de tratamiento aplicables a instituciones prestadoras de servicios de salud.

En el ámbito académico, esta investigación fortalece el conocimiento sobre el empleo de procesos de oxidación avanzada para la remoción de contaminantes farmacéuticos, aportando información que podrá ser utilizada como base para estudios posteriores.

Adicionalmente, este trabajo contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 14 (Vida

submarina), al promover alternativas tecnológicas orientadas a mejorar la calidad del agua y disminuir los impactos derivados de los contaminantes emergentes.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos mediante un proceso de oxidación avanzada aplicado a las aguas residuales provenientes de un centro hospitalario de Popayán, Cauca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración de los contaminantes emergentes farmacéuticos de mayor presencia en las aguas residuales de un centro hospitalario de Popayán, Cauca.
- Diseñar un sistema de tratamiento no convencional basado en un proceso de oxidación avanzada para la degradación de contaminantes emergentes farmacéuticos.
- Estimar la eficiencia del sistema de oxidación avanzada en la remoción de los contaminantes emergentes farmacéuticos evaluados.

Capítulo 2. Marco teórico o referentes conceptuales.

2.1. Antecedentes

Los contaminantes emergentes farmacéuticos (CEF) constituyen un grupo de sustancias que en los últimos años ha despertado un creciente interés debido a los efectos que pueden ocasionar sobre los ecosistemas y la salud humana. Estos compuestos comprenden medicamentos de uso humano y veterinario, entre los que se incluyen antibióticos, analgésicos, antiinflamatorios, antidepresivos, antidiabéticos, drogas de abuso y suplementos alimenticios, entre otros. Su presencia ha sido reportada en diferentes cuerpos de agua alrededor del mundo, situación que ha generado preocupación por la limitada información disponible sobre sus efectos a largo plazo y por la capacidad limitada de los sistemas convencionales de tratamiento para eliminarlos completamente [2].

Una de las principales vías de incorporación de estos compuestos al ambiente corresponde a las aguas residuales provenientes de hospitales, centros asistenciales, viviendas e industrias farmacéuticas. En muchos casos, estos efluentes son descargados sin procesos de tratamiento específicos dirigidos a la remoción de contaminantes farmacéuticos, favoreciendo su permanencia y dispersión en los ecosistemas acuáticos [2].

En este contexto, Peña-Álvarez y Castillo-Alanís [8] desarrollaron una investigación enfocada en la identificación y cuantificación de contaminantes emergentes presentes en aguas residuales mediante la técnica de microextracción en fase sólida acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas (MEFS-CG-EM). El estudio permitió determinar la presencia de compuestos como triclosán y clorofeno, empleados como desinfectantes, además de naproxeno, ibuprofeno y bisfenol A, este último reconocido por su actividad como disruptor endocrino. Los autores optimizaron el procedimiento analítico obteniendo coeficientes de correlación superiores a 0,99 para ibuprofeno, naproxeno y bisfenol A, mientras que para triclosán y clorofeno los valores fueron mayores a 0,94. Asimismo, la metodología presentó coeficientes de variación comprendidos entre 6,2 % y 9,4 %, lo que evidenció una adecuada precisión analítica. Los resultados mostraron que los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP's) estuvieron presentes en todas las muestras analizadas, registrándose concentraciones del orden de $\mu\text{g/L}$. No obstante, después de los procesos de tratamiento las concentraciones disminuyeron considerablemente, hasta el punto de que algunos compuestos dejaron de ser cuantificables [4].

Por otra parte, Jaime Urbina y Vera Solano [7] realizaron una revisión sobre la presencia de contaminantes emergentes en las aguas residuales de la industria farmacéutica y las alternativas disponibles para su tratamiento mediante ozonización. La investigación, desarrollada a partir de literatura científica especializada, permitió establecer que los residuos farmacéuticos representan el grupo de contaminantes de mayor preocupación debido a su persistencia y a la dificultad para ser eliminados mediante tratamientos convencionales. Entre las diferentes tecnologías evaluadas, la ozonización fue identificada como una de las opciones más eficientes para la degradación de estos compuestos.

Los autores concluyeron que la aplicación de ozono favorece la oxidación de sustancias farmacéuticas como antiinflamatorios, antibióticos, anticonceptivos y antiepilépticos, alcanzando elevados porcentajes de degradación. Además de disminuir la carga contaminante, este proceso aporta beneficios ambientales y sanitarios, ya que contribuye a reducir el desarrollo de algas y microorganismos en los cuerpos de agua receptores, consolidándose como una alternativa técnicamente viable para el tratamiento de este tipo de efluentes [11].

De igual manera, López Ramírez et al. [12], mediante un artículo de revisión sobre procesos de oxidación avanzada (POA) aplicados al tratamiento de aguas residuales, señalaron que el incremento de contaminantes persistentes y la insuficiencia de la normativa ambiental han impulsado el desarrollo de tecnologías capaces de degradar compuestos recalcitrantes. Entre las alternativas analizadas se incluyen la oxidación química, los sistemas ozono/peróxido de hidrógeno, la oxidación electroquímica y el proceso Fenton.

Dentro de estas tecnologías, el proceso Fenton sobresale por su elevada eficiencia en el tratamiento de efluentes provenientes de industrias farmacéuticas, textiles, papeleras y petroquímicas. Como evidencia de su desempeño, los autores citan un estudio desarrollado en San Sebastián durante el año 2001, en el que se alcanzó una remoción del 56,4 % de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales de una industria farmacéutica. Igualmente, destacan que este proceso permite la degradación parcial o total de contaminantes orgánicos e inorgánicos persistentes mediante la generación de radicales hidroxilo, producidos por la reacción entre el hierro y el peróxido de hidrógeno. Diversas investigaciones coinciden en que la eficiencia del proceso depende principalmente de variables como la concentración del oxidante y del catalizador, el pH, la temperatura y el tiempo de reacción [15].

2.2. Marco conceptual o teórico

Aguas Residuales Hospitalarias (ARH). Las aguas residuales hospitalarias corresponden a los efluentes líquidos generados por hospitales, clínicas, laboratorios y demás instituciones prestadoras de servicios de salud durante el desarrollo de actividades asistenciales, médicas, de investigación y de limpieza. Su composición es altamente compleja debido a la presencia de materia orgánica, microorganismos patógenos, sustancias químicas, desinfectantes y residuos de medicamentos. Cuando estos efluentes son descargados sin un tratamiento adecuado, pueden deteriorar la calidad de los cuerpos de agua, alterar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y representar un riesgo para la salud pública, razón por la cual requieren un manejo y tratamiento especializado [13].

Contaminantes Emergentes Farmacéuticos (CEF). Los contaminantes emergentes farmacéuticos son compuestos derivados de medicamentos utilizados en medicina humana y veterinaria que alcanzan el medio ambiente principalmente mediante la excreción de los pacientes, los vertimientos hospitalarios y la disposición inadecuada de productos farmacéuticos. Aunque generalmente se encuentran en concentraciones reducidas, poseen una elevada actividad biológica y una importante persistencia ambiental. Debido a que los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales no fueron diseñados para remover este tipo de sustancias, los CEF pueden permanecer en el ambiente, acumularse en los ecosistemas acuáticos y ocasionar efectos adversos sobre diferentes organismos [14].

Procesos de Oxidación Avanzada (POA). Los procesos de oxidación avanzada constituyen un conjunto de tecnologías empleadas para el tratamiento de aguas contaminadas mediante la producción de especies altamente reactivas, especialmente radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$). Estas especies poseen un elevado potencial oxidante que permite degradar compuestos orgánicos persistentes que difícilmente son eliminados mediante tratamientos convencionales. Gracias a su capacidad para transformar fármacos, pesticidas y otros contaminantes complejos en sustancias de menor peligrosidad o incluso mineralizarlas, los POA representan una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales que contienen contaminantes emergentes farmacéuticos [15].

Proceso Foto-Fenton. El proceso Foto-Fenton es una variante de los procesos de oxidación avanzada que combina la acción del peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sales de hierro y una fuente de radiación ultravioleta o solar para favorecer la generación de radicales hidroxilos. Estas especies reactivas promueven la oxidación y degradación de los

contaminantes orgánicos presentes en el agua, transformándolos progresivamente en compuestos de menor complejidad e incluso alcanzando su mineralización bajo condiciones favorables. Debido a su alta eficiencia frente a contaminantes farmacéuticos, esta tecnología se ha consolidado como una de las alternativas más prometedoras para el tratamiento de aguas residuales hospitalarias [16].

Fármacos analgésicos. Los analgésicos son medicamentos destinados a aliviar o controlar el dolor sin producir pérdida del estado de conciencia. Su mecanismo de acción depende del tipo de fármaco, actuando sobre diferentes vías del sistema nervioso para disminuir la percepción del dolor y mejorar la condición clínica de los pacientes. Debido a que son ampliamente utilizados en hospitales y centros de atención en salud, estos medicamentos representan una de las principales fuentes de residuos farmacéuticos presentes en las aguas residuales hospitalarias. Su presencia continua en el ambiente ha despertado interés científico, ya que algunos principios activos presentan persistencia y pueden ocasionar efectos negativos sobre los organismos acuáticos y el equilibrio de los ecosistemas [17].

2.3. Bases legales

El desarrollo de la presente investigación se sustenta en un conjunto de disposiciones normativas de carácter nacional e internacional que orientan la gestión de las aguas residuales, los residuos generados en la atención en salud y la protección de los recursos hídricos frente a la presencia de contaminantes emergentes farmacéuticos.

En el ámbito nacional, la Resolución 1256 de 2021 establece los lineamientos para la gestión integral de los residuos generados durante la prestación de servicios de salud y otras actividades relacionadas. Aunque esta normativa no regula de manera específica los contaminantes emergentes farmacéuticos, sí contempla medidas para la adecuada gestión de residuos peligrosos y promueve acciones de prevención desde la fuente, contribuyendo a disminuir el riesgo de liberación de estas sustancias al ambiente [18].

Por su parte, el Decreto 3930 de 2010 constituye uno de los principales instrumentos regulatorios para la administración del recurso hídrico en Colombia, al definir las condiciones relacionadas con el uso del agua y el manejo de los vertimientos. En este sentido, resulta aplicable a las aguas residuales hospitalarias, ya que establece las obligaciones y criterios que deben cumplir las instituciones responsables de realizar descargas a los cuerpos de agua o al sistema de alcantarillado [19].

De igual forma, la Resolución 0631 de 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fija los parámetros y valores máximos permisibles para los vertimientos puntuales realizados a cuerpos de agua superficiales y al suelo. Esta regulación constituye un referente técnico para evaluar la calidad de los efluentes hospitalarios y verificar el cumplimiento de los límites establecidos para diferentes parámetros fisicoquímicos [20].

Complementariamente, el Decreto 1575 de 2007 reglamenta el sistema para la protección y el control de la calidad del agua destinada al consumo humano. Si bien esta disposición no aborda directamente la gestión de las aguas residuales ni de los contaminantes emergentes farmacéuticos, su finalidad de preservar la calidad del recurso hídrico guarda una estrecha relación con la necesidad de prevenir la contaminación de las fuentes de abastecimiento [21].

En el contexto internacional, la Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo actualiza las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE mediante la incorporación de un enfoque orientado al control de sustancias prioritarias y contaminantes emergentes. Dentro de este grupo se incluyen diversos compuestos farmacéuticos, reconociendo a las aguas residuales hospitalarias como una de las principales fuentes de liberación de estas sustancias hacia el ambiente acuático [22].

De igual manera, la Organización Mundial de la Salud (OMS), mediante las Guidelines for Drinking-water Quality, reconoce que los residuos farmacéuticos pueden encontrarse presentes en las fuentes de agua y resalta la importancia de implementar tecnologías de tratamiento más eficientes que permitan reducir los posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente [23].

Asimismo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha incorporado diferentes compuestos farmacéuticos dentro de la Contaminant Candidate List (CCL), identificándolos como contaminantes de interés para futuras regulaciones. Además, la entidad fomenta la investigación y aplicación de tecnologías avanzadas de tratamiento, entre ellas los procesos de oxidación avanzada y la ozonización, como alternativas para controlar este tipo de sustancias [24].

Finalmente, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) ha advertido sobre el incremento de contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales, especialmente aquellos asociados a actividades hospitalarias e industriales. En consecuencia, recomienda fortalecer las estrategias de prevención, promover una gestión

adecuada de estos residuos e implementar tecnologías avanzadas de tratamiento que permitan disminuir su impacto sobre los ecosistemas acuáticos y la salud pública [25].

Capítulo 3. Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental, orientado a evaluar la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos (CEF) presentes en aguas residuales hospitalarias mediante la aplicación de un proceso de oxidación avanzada. En una primera etapa se determinó la presencia y concentración de estos compuestos en un centro hospitalario ubicado en el municipio de Popayán (Cauca), con el propósito de identificar aquellos de mayor representatividad para el desarrollo de la investigación.

Posteriormente, a partir de una revisión sistemática de la literatura científica, se seleccionó la tecnología de oxidación avanzada más apropiada para el tratamiento de los contaminantes identificados y se establecieron las condiciones operacionales reportadas como más eficientes. Finalmente, se diseñó, construyó y evaluó un sistema experimental con el fin de determinar su capacidad para degradar los contaminantes farmacéuticos seleccionados en solución acuosa.

La metodología se organizó en tres fases, las cuales fueron definidas de acuerdo con los objetivos específicos planteados para el desarrollo del estudio.

3.1. Fase 1. Determinación de la concentración de contaminantes emergentes de mayor uso en un centro hospitalario de Popayán, Cauca

3.1.1. Actividad 1. Visita de campo

Como primera actividad se realizó una visita técnica a un centro hospitalario localizado en la ciudad de Popayán, departamento del Cauca, seleccionado como área de estudio debido a su importancia regional en la prestación de servicios de salud de alta complejidad y al elevado consumo de medicamentos asociado a sus actividades asistenciales.

Durante la jornada se efectuó un reconocimiento general de las instalaciones con el propósito de identificar el punto más adecuado para la recolección de las muestras de agua residual hospitalaria. Para ello se inspeccionó la red interna de drenaje, las cajas de inspección y los puntos de descarga hacia el sistema de alcantarillado, apoyándose en los planos hidráulicos suministrados por la institución. Esta información permitió seleccionar el sitio de muestreo que garantizara la representatividad del efluente generado por el centro hospitalario.

3.1.2. Actividad 2. Muestreo

La obtención de las muestras se realizó mediante un muestreo compuesto, con el fin de obtener una representación adecuada de la variación temporal de las características del agua residual hospitalaria y de las cargas contaminantes presentes durante la jornada de operación del centro asistencial.

El procedimiento se desarrolló conforme a los lineamientos establecidos por la guía para el muestreo de aguas residuales del IDEAM [26]. Se recolectaron diez muestras compuestas de 4 L cada una durante diez días consecutivos, identificadas como M1, M2, M3 hasta M10. Cada muestra estuvo conformada por alícuotas obtenidas cada hora a lo largo de un periodo de doce horas, tal como se presenta en la Figura 1.

El volumen correspondiente a cada alícuota fue determinado mediante la Ecuación 1. Para ello se calculó inicialmente el caudal de descarga, considerando variables como la velocidad del flujo, la altura de la lámina de agua y el área transversal de la tubería.

Figura 1

Recolección de las muestras durante un periodo de 12 horas.



Nota. Elaboración propia.

El volumen de la alícuota de cada muestra fue calculado con la Ecuación 1. Para determinar el volumen de cada alícuota, inicialmente se calculó el caudal de salida en la tubería de descarga teniendo en cuenta la velocidad del flujo, la altura de la lámina de agua y el área de sección transversal, mediante la ecuación:

$$Q = A * v \text{ Ec. 1}$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal del vertimiento} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

$$A = \text{Área de la sección transversal del flujo (m}^2\text{)}$$

$$v = \text{Velocidad del flujo} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

Una vez calculado el caudal, se calculó el volumen de la alícuota de cada muestra por medio de la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{V_t * Q_i}{Q_p * n} \text{ Ec. 2}$$

Donde:

$$V_a = \text{Volumen de alícuota}$$

$$V_t = \text{Volumen total}$$

$$Q_i = \text{Caudal inicial}$$

$$Q_p = \text{Caudal promedio}$$

$$n = \text{número de muestras tomadas}$$

Finalizada la recolección, las muestras fueron homogenizadas y almacenadas en neveras de icopor con geles refrigerantes, manteniendo temperaturas entre 4 y 6 °C para preservar sus características fisicoquímicas y evitar alteraciones en la estabilidad de los compuestos farmacéuticos antes de su análisis.

Posteriormente, las muestras fueron distribuidas de acuerdo con los análisis requeridos. Una parte fue enviada al Laboratorio CROM-MASS de la Universidad Industrial de Santander (UIS), donde se efectuó la cuantificación de contaminantes emergentes farmacéuticos. El volumen restante fue trasladado al Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual.

Durante esta etapa se efectuaron mediciones in situ y ex situ. Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados fueron expresados mediante el valor promedio acompañado de su respectiva desviación estándar. Los parámetros evaluados, los equipos empleados y el tipo de medición realizada se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1*Parámetros y equipos utilizados en muestreo Ex situ e In situ*

Parámetro	Equipo	Método
pH	pH-metro Hach	<i>Ex situ</i>
DQO	Espectrofotómetro UV/VIS	
DBO₅	Incubadora oxitop	
Turbidez	Turbidímetro Hach 2100 Q	<i>In situ</i>
Conductividad	Sonda multiparamétrica Hanna	
Oxígeno disuelto (OD)	Sonda multiparamétrica Hanna	
TDS	Sonda milimétrica, Hanna	

Nota. Elaboración propia.**3.1.3. Actividad 3. Caracterización de los contaminantes emergentes del agua residual**

La identificación y cuantificación de los contaminantes emergentes farmacéuticos presentes en las muestras de agua residual hospitalaria se realizó mediante cromatografía líquida de alta eficiencia acoplada a espectrometría de masas en tándem (HPLC-MS/MS), utilizando un espectrómetro de masas de triple cuadrupolo (LC-QQQ-MS) perteneciente al Laboratorio CROM-MASS de la Universidad Industrial de Santander.

Esta técnica constituye una de las metodologías analíticas más utilizadas para la determinación de contaminantes orgánicos en matrices ambientales, debido a su elevada sensibilidad, selectividad y capacidad para detectar compuestos presentes incluso en concentraciones muy bajas [27].

La separación cromatográfica se llevó a cabo empleando una columna de fase reversa C18, la cual permite diferenciar los analitos según su afinidad e hidrofobicidad. Como fase móvil se utilizó un sistema de elución en gradiente compuesto por agua ultrapura acidificada con 0,1 % de ácido fórmico (fase A) y acetonitrilo acidificado con el mismo porcentaje de ácido fórmico (fase B), manteniendo un caudal entre 0,2 y 0,3 mL/min. La incorporación de ácido fórmico favorece la estabilidad de las especies iónicas y mejora la eficiencia del proceso de ionización durante el análisis por espectrometría de masas [28].

La detección de los compuestos se efectuó mediante ionización por electrospray (ESI) en modo positivo, técnica especialmente adecuada para analitos polares y semipolares, ya que

facilita la formación de iones protonados sin provocar una degradación térmica significativa. La confirmación de cada compuesto se realizó comparando los tiempos de retención y las relaciones masa/carga (m/z) obtenidas experimentalmente con estándares analíticos certificados, garantizando así la correcta identificación de los analitos evaluados [29].

Con el propósito de incrementar la sensibilidad del método y reducir las interferencias ocasionadas por la matriz del agua residual, previamente se aplicó una extracción en fase sólida (SPE), utilizada como etapa de preconcentración de los analitos. Este procedimiento permitió recuperar eficientemente compuestos presentes en concentraciones del orden de ng/L y $\mu\text{g/L}$. Finalmente, la cuantificación se efectuó mediante curvas de calibración construidas con estándares externos, verificando la linealidad del método dentro del rango de concentraciones establecido. Gracias a su precisión, reproducibilidad y elevada sensibilidad, la técnica HPLC-MS/MS constituye una herramienta fundamental para evaluar la presencia y el comportamiento de contaminantes farmacéuticos en sistemas de tratamiento de aguas residuales [30].

3.2. Fase 2. Diseño de un sistema de tratamiento no convencional para la degradación de contaminantes

3.2.1. Actividad 1. Revisión bibliográfica para la selección de la tecnología de tratamiento

Con el propósito de seleccionar la tecnología más adecuada para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos, se desarrolló una revisión sistemática de la literatura siguiendo la metodología propuesta por Torres-Carrión (2018). Este procedimiento permitió organizar el proceso de búsqueda, selección y análisis de la información científica mediante los criterios establecidos en la Tabla 2.

Tabla 2.

Definición de ítems para la ejecución de la revisión sistemática

Ítem	Descriptor
Objetivo	Identificar las tecnologías de los procesos de oxidación avanzada más eficientes para la remoción de CEF.
Pregunta de investigación	¿Cuál es la tecnología de los procesos de oxidación avanzada más eficiente y con menos requerimientos operativos para la remoción de CEF?
Criterios de Inclusión	• Artículos científicos (inglés y español) • Investigaciones a escala piloto y real • Tecnologías POA • Artículos Open Access • Contaminantes emergentes farmacéuticos

Ítem	Descriptor
	• Periodo 2015 – 2025
Criterios de Exclusión	• Informes técnicos, tesis o no publicados en revistas científicas • Investigaciones sin datos cuantitativos • Tecnologías de tratamiento convencional • Artículos Pay Access • Contaminantes emergentes diferentes a los farmacéuticos • Artículos inferiores a 2015
Palabras clave	Procesos de oxidación avanzada, Contaminantes emergentes farmacéuticos, Aguas residuales Hospitalarias.
Bases de datos	Science Direct, Springer y Taylor and Francis
Ecuaciones de búsqueda	1. ("hospital wastewater" OR "healthcare wastewater") AND ("pharmaceutical contaminants" OR "emerging contaminants") AND ("photo-Fenton" OR "photo Fenton process") 2. ("emerging contaminants" OR pharmaceuticals) AND ("hospital wastewater") AND ("advanced oxidation processes" AND "photo-Fenton") 3. ("hospital wastewater") AND ("Fenton" OR "photo-Fenton") AND ("pharmaceutical residues")

Nota. Elaboración propia.

Las estrategias de búsqueda fueron construidas a partir de palabras clave relacionadas con los procesos de oxidación avanzada, los contaminantes emergentes farmacéuticos y las aguas residuales hospitalarias. Estas ecuaciones fueron aplicadas en las bases de datos ScienceDirect, Springer y Taylor & Francis, con el fin de identificar publicaciones científicas pertinentes dentro del periodo comprendido entre 2015 y 2025.

Posteriormente, los documentos recuperados fueron sometidos a los criterios de inclusión y exclusión definidos previamente. Una vez depurados los registros duplicados, los artículos seleccionados fueron organizados de acuerdo con categorías y subcategorías temáticas, facilitando su análisis y comparación, tal como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3

Categorías y subcategorías de análisis

Categoría	Subcategoría
Tecnologías POA	• Fenton • Foto-fenton • Ozonización • UV/H₂O₂ • Fotocatálisis • Foto-electro-ozonización

	• Kokkinos et al. (2021)
Tipos de CEF	• Analgésicos y antiinflamatorios • Antibióticos • Antihipertensivos • Psiquiátricos • Betabloqueadores • Anticáncer • Antivirales • Antidiabéticos
Eficiencia de remoción	• <50% • 50-80 • >80%

Nota. Elaboración propia.

Con base en la información recopilada, se identificó la tecnología de oxidación avanzada que presentó el mayor potencial para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos. Posteriormente, se realizó un análisis detallado de las investigaciones que implementaron dicha tecnología, con el propósito de reconocer las principales condiciones de operación reportadas, tales como pH, temperatura, concentraciones de reactivos y tiempos de reacción. Esta revisión permitió establecer los parámetros de referencia para el diseño experimental, identificar las variables que influyen en la eficiencia del proceso y definir condiciones operacionales que favorecieran un mejor desempeño del sistema de tratamiento.

3.2.2. Actividad 2. Dimensionamiento del prototipo del sistema de tratamiento

El diseño del sistema de tratamiento se realizó considerando condiciones de operación representativas del proceso que se pretendía evaluar. Para ello, se tomaron como base los criterios obtenidos durante la revisión sistemática, especialmente aquellos relacionados con las variables que demostraron mayor influencia sobre la degradación de contaminantes farmacéuticos.

Como punto de partida se estableció el caudal máximo de operación, parámetro que sirvió de referencia para el dimensionamiento del prototipo experimental. El diseño se desarrolló siguiendo los lineamientos metodológicos propuestos por Escobar Tovar *et al.* [60] para reactores construidos en tubería de PVC, realizando las modificaciones necesarias para adaptarlo a las condiciones de la presente investigación.

Entre las principales adaptaciones se incorporó una fuente de irradiación ultravioleta (UV), seleccionando materiales compatibles con este tipo de radiación, como el vidrio borosilicato y el cuarzo. Asimismo, se definieron aspectos constructivos relacionados con las

dimensiones del reactor, el sistema de agitación, la potencia del motor y la disposición de las válvulas de entrada y salida, buscando garantizar condiciones hidráulicas estables y un funcionamiento adecuado durante las pruebas experimentales.

El volumen útil del reactor fue calculado considerando las dimensiones del sistema y de la lámpara UV, empleando la Ecuación 3.

$$Vol = \pi * (d)^2 * H \text{ Ec. 3}$$

Donde,

$$Vol = \text{Volumen a calcular}$$

$$\pi = \text{pi (constante matematica)}$$

$$d = \text{diametro}$$

$$H = \text{Altura}$$

3.2.3. Actividad 3. Construcción y puesta en marcha del sistema

Una vez definido el diseño del prototipo, se procedió con su construcción y posterior evaluación operativa. Durante esta etapa se verificó el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema, prestando especial atención a la circulación del caudal, la estanqueidad del reactor y la operación de las válvulas de entrada y salida, con el propósito de prevenir inconvenientes durante la fase experimental.

El sistema fue conformado por un reactor equipado con una fuente de irradiación ultravioleta y un mecanismo de agitación, elementos necesarios para favorecer el desarrollo del proceso de oxidación avanzada. Después del ensamblaje del prototipo se realizaron ensayos hidráulicos destinados a comprobar la estabilidad de la operación antes de iniciar las pruebas de degradación de los contaminantes emergentes farmacéuticos identificados durante la primera fase de la investigación.

3.3. Fase 3. Estimación de la eficacia del sistema de oxidación avanzada para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos

3.3.1. Actividad 1. Diseño experimental

Con el fin de evaluar el efecto de las variables de operación sobre la degradación de los contaminantes emergentes farmacéuticos, se implementó un diseño experimental factorial

completo (3³), el cual permitió estudiar simultáneamente la influencia de los diferentes factores y establecer las condiciones que favorecen la mayor eficiencia del proceso.

Los experimentos se desarrollaron en un sistema batch, empleando soluciones preparadas a partir de medicamentos comerciales de alta pureza. Las condiciones de operación fueron establecidas de acuerdo con el diseño experimental, manteniendo constantes las demás variables del proceso para garantizar la comparación entre los tratamientos evaluados.

La eficiencia del sistema fue determinada mediante el porcentaje de degradación obtenido para cada contaminante, permitiendo analizar el comportamiento del proceso bajo las diferentes combinaciones experimentales.

Al finalizar cada ensayo se tomó una alícuota de la solución tratada, la cual fue transferida a una cubeta de cuarzo para medir su absorbancia mediante espectrofotometría UV/Vis, utilizando la longitud de onda característica de cada compuesto. Las concentraciones iniciales (Ci) y finales (Cf) fueron obtenidas a partir de las respectivas curvas de calibración, mientras que el porcentaje de degradación (%R) se calculó empleando la Ecuación 3.

$$\%R = \frac{C_f - C_i}{C_i} \times 100 \text{ Ec. 3}$$

3.3.2. Actividad 2. Cuantificación de los contaminantes emergentes farmacéuticos

La concentración de los contaminantes emergentes farmacéuticos después de cada tratamiento fue determinada mediante espectrofotometría UV/Vis utilizando el equipo Nanocolor UV/Vis NUV20358. La cuantificación se realizó mediante curvas de calibración previamente construidas para cada compuesto, permitiendo establecer la concentración residual presente en las muestras tratadas.

3.3.3. Actividad 3. Pruebas de remoción en el prototipo

Las pruebas experimentales en el prototipo fueron desarrolladas utilizando las condiciones que presentaron los mayores porcentajes de degradación durante los ensayos realizados en el sistema batch. El volumen de operación fue ajustado considerando el caudal definido para el sistema experimental.

Durante cada ensayo se adicionaron los reactivos necesarios para el desarrollo del proceso de oxidación avanzada, empleando uno de ellos como fuente de radicales hidroxilos y el otro como catalizador. Las pruebas se efectuaron manteniendo constantes las condiciones de pH y el tiempo de reacción previamente establecidos, mientras que la irradiación ultravioleta

se aplicó durante intervalos definidos experimentalmente con el propósito de evaluar la eficiencia del sistema en la degradación de los contaminantes farmacéuticos.

3.3.4. Actividad 4. Análisis de la información

Los porcentajes de degradación obtenidos mediante la ecuación correspondiente fueron utilizados para evaluar la influencia de los diferentes factores experimentales sobre la variable de respuesta y determinar las condiciones de operación que favorecieron la mayor remoción de los contaminantes estudiados.

Los resultados fueron expresados como promedio de las mediciones realizadas y posteriormente analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA de una vía) empleando el software R. Adicionalmente, se verificó el cumplimiento de los supuestos estadísticos mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene, con el fin de garantizar la validez de las comparaciones realizadas entre los tratamientos experimentales [31].

Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1. Fase 1. Determinación de la concentración de contaminantes emergentes de mayor uso en un centro hospitalario de Popayán, Cauca

4.1.1. Actividad 1. Visita de campo

Como parte de la fase inicial de la investigación se efectuó una visita técnica al centro hospitalario seleccionado, con el propósito de reconocer el sistema de manejo de aguas residuales e identificar el punto de muestreo que garantizara la obtención de muestras representativas del efluente generado por la institución. Esta actividad permitió conocer la infraestructura sanitaria y establecer las condiciones necesarias para el desarrollo del monitoreo.

El análisis de los planos hidráulicos y de saneamiento suministrados por el hospital permitió establecer que la caja de inspección final correspondía al punto más adecuado para la recolección de las muestras, debido a que allí convergen las descargas provenientes de las diferentes áreas asistenciales, entre ellas urgencias, hospitalización, consulta externa, laboratorios clínicos y quirófanos. En consecuencia, las muestras obtenidas representan de manera integral la composición del agua residual hospitalaria generada por la institución.

La selección del sitio de muestreo se realizó conforme a los lineamientos establecidos por el IDEAM [26], garantizando la representatividad del vertimiento y la confiabilidad de los resultados obtenidos durante la caracterización.

4.1.1.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en el Hospital Susana López de Valencia, ubicado en el municipio de Popayán, departamento del Cauca. Esta institución pública presta servicios de salud de segundo nivel de complejidad y constituye uno de los principales centros de referencia del departamento, atendiendo población tanto urbana como rural proveniente de diferentes municipios de la región [32].

Su infraestructura comprende las sedes La Ladera y San Camilo, donde se distribuyen servicios como urgencias, hospitalización, cirugía, consulta externa especializada, laboratorio clínico, farmacia y diferentes áreas de apoyo diagnóstico. La diversidad de actividades desarrolladas implica un elevado consumo de medicamentos, desinfectantes y otros productos

químicos, los cuales pueden incorporarse posteriormente a las aguas residuales hospitalarias [32].

Debido al número de pacientes atendidos diariamente y a la variedad de procedimientos médicos realizados, la institución genera efluentes con una composición compleja, caracterizada por la presencia de materia orgánica, microorganismos y residuos farmacéuticos. Asimismo, el hospital dispone de información relacionada con el consumo de medicamentos, registros asistenciales y protocolos de bioseguridad, aspectos que facilitaron la identificación de los contaminantes de mayor interés para la investigación [32].

Considerando estas características, el Hospital Susana López de Valencia constituye un escenario representativo para el estudio de contaminantes emergentes farmacéuticos en aguas residuales hospitalarias, ya que sus vertimientos requieren seguimiento permanente y estrategias de tratamiento que permitan minimizar los impactos sobre el recurso hídrico y garantizar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente [26].

La Figura 2 presenta una vista general de la institución, mientras que la Figura 3 muestra la ubicación del punto de muestreo seleccionado, correspondiente a la caja de inspección localizada en el área del parqueadero, en las coordenadas N 2°26'15,659" y W 76°37'8,243". En este sitio se realizaron tanto la recolección de las muestras compuestas como la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua residual hospitalaria.

El sistema interno de evacuación del hospital dispone de dos cajas principales de inspección, ubicadas en las áreas de atención neonatal y hospitalización de adultos. Sin embargo, el punto seleccionado concentra el flujo proveniente de ambas líneas de descarga, permitiendo obtener una muestra representativa de la totalidad del efluente generado.

Durante la inspección se evidenció que las aguas residuales presentan una elevada carga contaminante asociada principalmente a materia orgánica, microorganismos y residuos de medicamentos utilizados en los diferentes servicios asistenciales. Estos compuestos ingresan al sistema de alcantarillado mediante las excreciones de los pacientes, el lavado de equipos médicos y la disposición de residuos líquidos. Debido a que el hospital no dispone de un tratamiento específico previo al vertimiento, las aguas residuales son conducidas directamente hacia la red de alcantarillado municipal y posteriormente al río Ejido, situación que representa una fuente potencial de contaminación para el cuerpo receptor y los ecosistemas asociados.

Figura 2. Hospital Susana López de Valencia



Nota. Figura tomada de Google [78].

El punto de muestreo seleccionado corresponde a la caja de inspección mostrada en la Figura 2, ubicada dentro de las instalaciones del Hospital Susana López de Valencia (HSLV), específicamente en el área del parqueadero, en las coordenadas N 2°26'15,659" y W 76°37'8,243". En este lugar se realizó la toma de muestras compuestas y el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales hospitalarias (ARH), con el fin de evaluar la calidad del vertimiento generado por las diferentes actividades del hospital, tanto asistenciales como administrativas y de servicios generales.

El sistema interno de evacuación de aguas residuales (AR) del hospital cuenta con dos cajas de inspección principales, ubicadas en distintas áreas: una en el servicio de atención neonatal y otra en el área de hospitalización de adultos. Estas permiten hacer seguimiento y control a los vertimientos generados en cada zona, de acuerdo con las actividades que allí se realizan.

Figura 3. Ubicación de la caja de inspección (Punto de muestreo) del sistema de ARH del Hospital Susana López de Valencia.



Nota. Elaboración propia con la herramienta Google Earth.

A partir del análisis en este punto, se observó que las aguas residuales presentan una alta carga contaminante, principalmente por la presencia de materia orgánica, microorganismos y residuos de medicamentos utilizados durante la atención de los pacientes. Entre estos se encuentran fármacos de uso frecuente, que ingresan al sistema a través de las excreciones de los pacientes, el lavado de equipos y la disposición de residuos líquidos. Como el hospital no cuenta con un sistema de tratamiento previo para estas aguas, los vertimientos continúan hacia el alcantarillado municipal y posteriormente al río Ejido, lo que afecta directamente la calidad del agua y generar impactos en el ambiente.

4.1.2. Actividad 2. Resultados de la caracterización fisicoquímica

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos durante la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales hospitalarias, considerando parámetros determinados tanto in situ como ex situ. En conjunto, los datos evidencian una marcada variabilidad entre las diez jornadas de muestreo, comportamiento que refleja la naturaleza dinámica de los vertimientos hospitalarios y la influencia de factores como la demanda de los servicios asistenciales, el consumo de medicamentos, las actividades de limpieza y desinfección, así como las variaciones en el caudal generado durante cada jornada.

Tabla 4*Resultados de la caracterización fisicoquímica in-situ y ex-situ de las ARH*

Muestra	PARÁMETRO											
	Turbiedad (NTU)	ST (mg/L)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)	Conductividad (μ S/cm)	OD (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	Acidez (mgCaCO ₃ /L)	Temperatura (°C)
1	113 $\pm$ 25	560 $\pm$ 134	307 $\pm$ 133	253 $\pm$ 50	793 $\pm$ 5	4,92 $\pm$ 0,03	320	531 $\pm$ 183	8,45 $\pm$ 0,04	0,29 $\pm$ 0,05	2 $\pm$ 1	22,1 $\pm$ 0,8
2	99 $\pm$ 7	640 $\pm$ 260	471 $\pm$ 168	169 $\pm$ 23	1008 $\pm$ 28	4,91 $\pm$ 0,06	430	700 $\pm$ 187	8,43 $\pm$ 0,04	0,36 $\pm$ 0,05	3 $\pm$ 1	21,6 $\pm$ 0,5
3	72 $\pm$ 6	473 $\pm$ 173	319 $\pm$ 109	157 $\pm$ 72	1768 $\pm$ 13	5,26 $\pm$ 0,03	260	411 $\pm$ 47	8,26 $\pm$ 0,03	0,24 $\pm$ 0,05	1,8 $\pm$ 0,2	21,6 $\pm$ 0,8
4	123 $\pm$ 8	360 $\pm$ 69	167 $\pm$ 91	173 $\pm$ 56	1409 $\pm$ 21	6,25 $\pm$ 0,02	190	786 $\pm$ 82	8,50 $\pm$ 0,02	0,40 $\pm$ 0,03	1,8 $\pm$ 0,2	24 $\pm$ 8
5	210 $\pm$ 41	646 $\pm$ 83	386 $\pm$ 143	260 $\pm$ 121	2933 $\pm$ 15	4,92 $\pm$ 0,02	460	2753 $\pm$ 137	5,99 $\pm$ 0,01	12 $\pm$ 2	5 $\pm$ 2	22,1 $\pm$ 0,7
6	87 $\pm$ 9	420 $\pm$ 110	305 $\pm$ 48	115 $\pm$ 90	3897 $\pm$ 48	4,87 $\pm$ 0,05	410	493 $\pm$ 42	7,44 $\pm$ 0,04	16 $\pm$ 2	6 $\pm$ 2	22 $\pm$ 1
7	217 $\pm$ 42	511 $\pm$ 90	297 $\pm$ 67	214 $\pm$ 77	3417 $\pm$ 10	5,46 $\pm$ 0,04	450	1008 $\pm$ 8	6,18 $\pm$ 0,01	13 $\pm$ 3	6 $\pm$ 3	23 $\pm$ 1
8	154 $\pm$ 17	533 $\pm$ 91	408 $\pm$ 175	125 $\pm$ 83	3273 $\pm$ 15	5,42 $\pm$ 0,02	350	593 $\pm$ 52	6,7 $\pm$ 0,3	13 $\pm$ 2	18,7 $\pm$ 0,6	23 $\pm$ 2
9	165 $\pm$ 27	500 $\pm$ 80	150 $\pm$ 60	350 $\pm$ 95	3352 $\pm$ 33	4,58 $\pm$ 0,02	220	378 $\pm$ 36	8,05 $\pm$ 0,02	20 $\pm$ 3	22,5 $\pm$ 0,3	21,9 $\pm$ 0,9
10	218 $\pm$ 51	666 $\pm$ 128	384 $\pm$ 108	282 $\pm$ 52	2933 $\pm$ 6	6,03 $\pm$ 0,02	330	518 $\pm$ 23	7,67 $\pm$ 0,02	13 $\pm$ 3	21,8 $\pm$ 0,4	25 $\pm$ 7

Nota. Elaboración propia

Los valores de turbidez oscilaron entre 71,8 NTU y 218 NTU, registrándose el valor mínimo en la muestra correspondiente al tercer día y el máximo durante el décimo día de monitoreo. Estas diferencias indican cambios importantes en la cantidad de partículas suspendidas y material coloidal presente en el agua residual, los cuales pueden estar asociados a variaciones en las actividades desarrolladas dentro del hospital y al incremento de residuos líquidos provenientes de los diferentes servicios asistenciales. Niveles elevados de turbidez, como los registrados en la última jornada de muestreo, pueden disminuir la penetración de la radiación ultravioleta y reducir la eficiencia de procesos de tratamiento basados en oxidación avanzada, debido a la interferencia que generan las partículas suspendidas sobre la transmisión de la luz [33].

Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos para los sólidos suspendidos totales (SST), cuya concentración alcanzó un valor máximo de 350 mg/L en la muestra correspondiente al día nueve. La presencia de estas concentraciones evidencia una carga considerable de material particulado, condición característica de las aguas residuales hospitalarias. Desde el punto de vista ambiental, concentraciones elevadas de SST favorecen la sedimentación de sólidos, disminuyen la penetración de la luz en los cuerpos receptores y afectan las condiciones necesarias para el desarrollo de organismos acuáticos, incrementando el riesgo de deterioro de los ecosistemas [34].

Por otra parte, la conductividad eléctrica presentó una tendencia creciente durante el periodo de evaluación, alcanzando un valor máximo de 3897 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este resultado indica una elevada concentración de especies iónicas disueltas, asociadas principalmente al uso de soluciones salinas, reactivos químicos, detergentes, desinfectantes y medicamentos empleados durante la atención hospitalaria. Valores de esta magnitud reflejan un importante grado de mineralización del efluente y confirman que las aguas residuales hospitalarias poseen una composición química más compleja que la observada habitualmente en aguas residuales domésticas [35].

En relación con el oxígeno disuelto (OD), el mayor valor registrado fue de 6,25 mg/L, correspondiente al cuarto día de muestreo. Aunque este nivel podría considerarse adecuado desde el punto de vista de la disponibilidad de oxígeno, su interpretación debe realizarse juntamente con los resultados obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En este estudio se registraron concentraciones máximas de 460 mg/L y 2753 mg/L, respectivamente, valores que evidencian una elevada carga de materia orgánica biodegradable y compuestos químicamente oxidables. Esta combinación

sugiere que, pese a la presencia puntual de oxígeno disuelto, el sistema posee un elevado potencial de consumo de oxígeno, condición que puede afectar significativamente el equilibrio ecológico de los cuerpos de agua receptores [36], [37].

El pH mostró variaciones durante el periodo de monitoreo, registrándose valores comprendidos entre 5,99 y 8,50. Estas fluctuaciones pueden atribuirse a cambios en la composición de las descargas hospitalarias, particularmente por el uso de productos de limpieza, desinfectantes, soluciones químicas y residuos farmacéuticos generados en las diferentes áreas de atención [3]. Este parámetro adquiere especial importancia debido a que influye directamente sobre la disponibilidad del hierro como catalizador y sobre la generación de radicales hidroxilos durante los procesos de oxidación avanzada. Diferentes investigaciones señalan que valores de pH cercanos a condiciones ácidas favorecen el desarrollo del proceso Foto-Fenton, mientras que valores más elevados pueden disminuir la eficiencia del tratamiento debido a la precipitación del hierro y a la reducción en la formación de especies oxidantes [38], [39].

Los resultados de alcalinidad y acidez también evidenciaron una marcada variabilidad entre las muestras analizadas. Los mayores valores se registraron durante el noveno día de muestreo, alcanzando aproximadamente 20 mg CaCO_3/L para alcalinidad y 22 mg CaCO_3/L para acidez. Estos resultados reflejan la heterogeneidad de los vertimientos hospitalarios y ponen de manifiesto la influencia de diferentes compuestos químicos sobre el equilibrio ácido-base del agua residual [40]. Desde una perspectiva ambiental, estas variaciones pueden modificar las condiciones del cuerpo receptor, alterar la disponibilidad de nutrientes y favorecer la movilización de determinados metales presentes tanto en el agua como en los sedimentos.

Respecto a la temperatura, los registros mostraron un comportamiento relativamente estable durante todo el periodo de estudio, con un promedio cercano a 24,5 °C. Este comportamiento corresponde a las condiciones climáticas predominantes de la ciudad de Popayán y a las características propias del efluente hospitalario. Sin embargo, temperaturas dentro de este rango pueden favorecer el desarrollo de procesos biológicos y reacciones químicas que incrementan la velocidad de degradación de la materia orgánica y el consumo de oxígeno cuando existen altas cargas contaminantes [41].

En términos generales, la caracterización fisicoquímica evidencia que las aguas residuales hospitalarias presentan una composición altamente variable y una importante carga contaminante, influenciada por la naturaleza de las actividades desarrolladas dentro del centro

asistencial. Los elevados valores registrados para parámetros como SST, DBO₅ y DQO superan los límites establecidos por la Resolución 0631 de 2015, indicando que el vertimiento no cumple con varios de los criterios exigidos por la normativa ambiental colombiana [42]. Aunque variables como el oxígeno disuelto y la temperatura se mantuvieron dentro de rangos aceptables, estos resultados no compensan la elevada concentración de materia orgánica, sólidos e iones disueltos identificados durante el estudio. En consecuencia, la información obtenida confirma la necesidad de implementar tratamientos más eficientes, como los procesos de oxidación avanzada, que permitan disminuir la carga contaminante y reducir el impacto de estos vertimientos sobre los ecosistemas acuáticos.

4.1.3. Actividad 3. Caracterización de contaminantes emergentes del agua residual

La identificación de los contaminantes emergentes farmacéuticos (CEF) presentes en las muestras de aguas residuales hospitalarias se realizó considerando, en primera instancia, la información suministrada por el centro hospitalario sobre los medicamentos de mayor consumo dentro de la institución. Esta información fue complementada con el análisis instrumental efectuado en el Laboratorio CROM-MASS de la Universidad Industrial de Santander (UIS), utilizando cromatografía líquida de ultra alta eficiencia acoplada a espectrometría de masas de alta resolución (UHPLC-HRMS), técnica ampliamente reconocida por su elevada sensibilidad y selectividad para la determinación de compuestos farmacéuticos en matrices ambientales complejas.

El procedimiento analítico empleado se fundamentó en metodologías ampliamente reportadas para la identificación y cuantificación de residuos farmacéuticos mediante técnicas cromatográficas acopladas a espectrometría de masas. Diversos estudios desarrollados por Petrovic, Gros y Barceló destacan que este tipo de análisis permite detectar compuestos presentes incluso en concentraciones muy bajas, ofreciendo resultados confiables en muestras de aguas residuales caracterizadas por su elevada complejidad química [43].

Los resultados obtenidos para las diez muestras analizadas se presentan en la Tabla 5, donde se reportan las concentraciones de acetaminofén (ACETA), doxiciclina y dopamina, expresadas en µg/L, así como los valores inferiores al límite de cuantificación establecido para cada compuesto.

Tabla 5

Resultados de los CEF obtenidos en muestras de agua enviadas al laboratorio de la UIS.

Muestra	Acetaminofén (µg/L)	Doxiciclina (µg/L)	Dopamina (µg/L)
M1	39,31	6,3	<0,8
M2	42,29	9,9	<0,8
M3	14,06	5,1	<0,8
M4	10,2	55,2	<0,8
M5	22,35	4	< 0,8
M6	42,29	9,9	< 0,8
M7	14,06	5,1	<0,8
M8	10,2	55,2	<0,8
M9	0,01	0,1	<0,8
M10	0,01	0,1	<0,8

Nota. Elaboración propia

El análisis de los resultados evidencia que el acetaminofén y la doxiciclina fueron los compuestos detectados con mayor frecuencia en las muestras evaluadas, mientras que la dopamina presentó concentraciones inferiores al límite de cuantificación (<0,8 µg/L) durante todo el periodo de muestreo. En las primeras muestras se registraron concentraciones cuantificables de los dos primeros compuestos, mientras que en las restantes se observó una disminución progresiva hasta alcanzar valores muy bajos o inferiores al límite analítico.

La variación observada entre las muestras puede atribuirse a diferentes factores asociados a la dinámica propia de los vertimientos hospitalarios. Entre ellos se encuentran las fluctuaciones en el consumo diario de medicamentos, los horarios de atención médica, las diferencias en el caudal del agua residual y posibles procesos de dilución ocasionados por aportes externos al sistema de alcantarillado. En conjunto, estas condiciones generan cambios temporales en la concentración de los contaminantes farmacéuticos presentes en el efluente hospitalario.

Dentro de los compuestos identificados, el acetaminofén (ACETA) presentó las concentraciones más elevadas, alcanzando valores máximos de 42,29 µg/L. Este comportamiento resulta consistente con el amplio uso de este medicamento como analgésico y antipirético tanto en el ámbito hospitalario como en la población general. Diversas investigaciones han reportado que el acetaminofén es uno de los fármacos detectados con mayor frecuencia en aguas residuales hospitalarias y municipales, debido a sus elevados niveles de consumo y a que una fracción importante del compuesto es excretada sin sufrir una

transformación completa en el organismo, llegando posteriormente a los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales [44].

Considerando estos resultados, el acetaminofén fue seleccionado como uno de los compuestos de interés para la fase experimental de la investigación. De manera complementaria, el listado de medicamentos suministrado por el centro hospitalario evidenció un alto consumo de tramadol (TML), analgésico ampliamente utilizado en procedimientos clínicos y frecuentemente reportado en estudios relacionados con contaminantes emergentes farmacéuticos [45].

La selección del tramadol respondió además a criterios analíticos. Tanto este compuesto como el acetaminofén presentan propiedades espectroscópicas que permiten su determinación mediante espectrofotometría UV, técnica disponible en el laboratorio institucional y adecuada para el seguimiento de los ensayos de degradación desarrollados durante esta investigación [46].

Es importante señalar que la selección de los compuestos objeto de estudio no dependió únicamente de su presencia en las aguas residuales hospitalarias, sino también de las capacidades analíticas disponibles. Mientras que el laboratorio de la Universidad Industrial de Santander dispone de un sistema UHPLC-ESI+-Orbitrap-HRMS, con capacidad para identificar y cuantificar una amplia variedad de contaminantes farmacéuticos, el laboratorio institucional empleó espectrofotometría UV, metodología que presenta menores niveles de sensibilidad y selectividad cuando se analizan matrices ambientales complejas.

En consecuencia, el desarrollo experimental se limitó al estudio del acetaminofén y el tramadol, ya que ambos compuestos pueden ser cuantificados adecuadamente mediante esta técnica. En el caso de la dopamina, las concentraciones detectadas fueron inferiores al límite de cuantificación, razón por la cual no fue posible incorporarla en las etapas posteriores del estudio.

Por otra parte, aunque la doxiciclina fue identificada durante la caracterización inicial, su evaluación experimental no resultó viable debido a que este antibiótico requiere metodologías analíticas de mayor sensibilidad, como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas. Adicionalmente, su determinación mediante espectrofotometría UV puede verse afectada por interferencias derivadas de la composición del agua residual, reduciendo la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos [47].

En conjunto, estos hallazgos demuestran que la selección de los contaminantes objeto de estudio debe considerar tanto su relevancia ambiental como las capacidades técnicas disponibles para su cuantificación, aspecto que resulta determinante en investigaciones relacionadas con contaminantes emergentes farmacéuticos.

Finalmente, las concentraciones detectadas durante la caracterización confirman la presencia de una carga farmacéutica significativa en las aguas residuales del centro hospitalario, lo que evidencia la necesidad de implementar tecnologías de tratamiento capaces de remover este tipo de compuestos antes de su descarga al ambiente. La presencia continua de analgésicos y antibióticos en los cuerpos de agua puede favorecer procesos como el desarrollo de resistencia bacteriana, alteraciones fisiológicas en organismos acuáticos y modificaciones en el funcionamiento de los ecosistemas, efectos que han sido ampliamente documentados en la literatura científica [48]. En este contexto, los resultados obtenidos respaldan la aplicación de procesos de oxidación avanzada como una alternativa para disminuir la liberación de contaminantes farmacéuticos al medio ambiente.

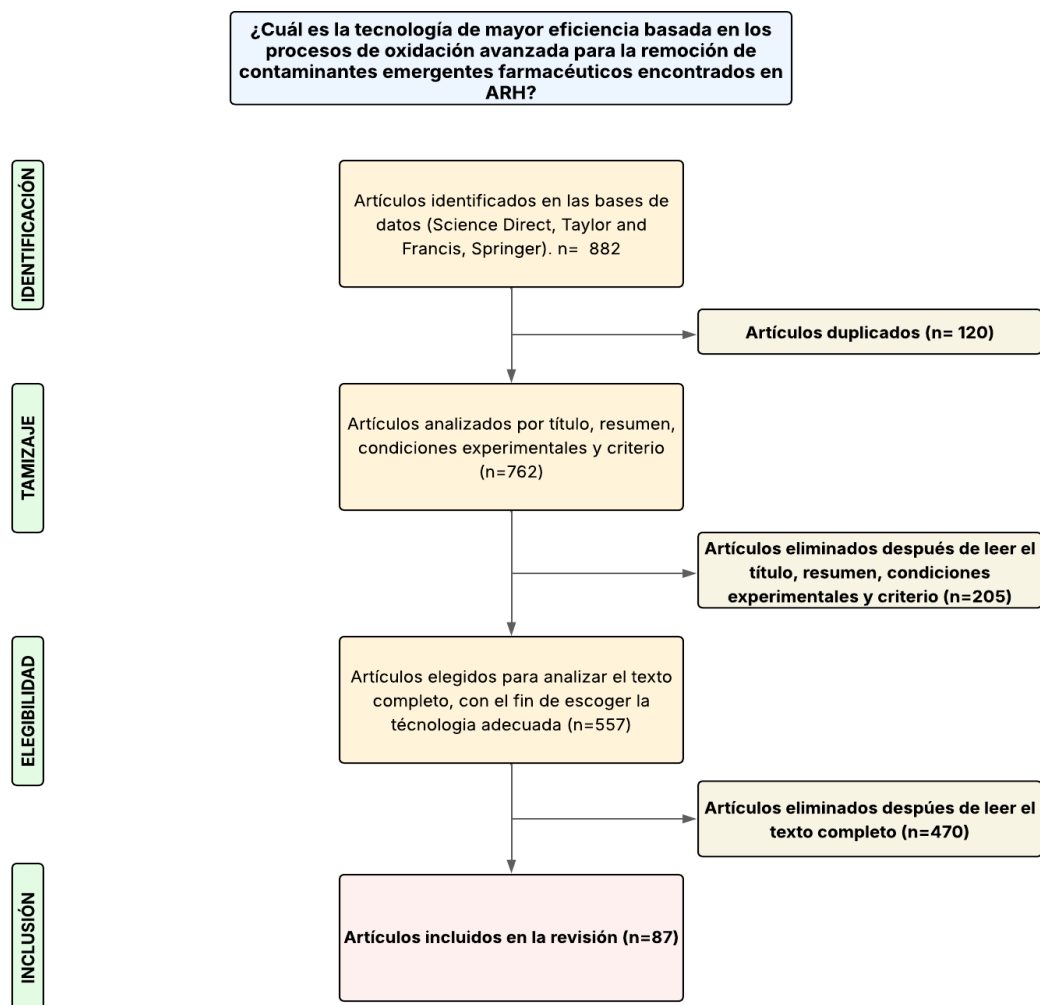
4.2. Fase 2. Diseño de un sistema de tratamiento no convencional para la degradación de contaminantes

4.2.1. Actividad 1. Revisión bibliográfica para la selección de la tecnología de tratamiento

La revisión sistemática permitió recopilar información científica sobre la aplicación de diferentes procesos de oxidación avanzada (POA) en la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos presentes en aguas residuales. A partir de las ecuaciones de búsqueda definidas en la metodología se recuperaron inicialmente 882 publicaciones provenientes de las bases de datos ScienceDirect, Springer y Taylor & Francis. Posteriormente, la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión redujo el conjunto documental a 87 artículos, los cuales constituyeron la base para el análisis de esta investigación.

Figura 4.

Resultados de la revisión bibliográfica para la selección de la tecnología de tratamiento



Nota. Elaboración propia.

El análisis de los artículos seleccionados (87) por las categorías establecidas, muestra inicialmente que las tecnologías más utilizadas dentro de los POA para el tratamiento del agua son el Foto-Fenton (21,8%) y el Fenton (17,2%), lo que indica que son opciones eficaces y accesibles para eliminar CE. Estas tecnologías permiten degradar sustancias perjudiciales como pesticidas, residuos industriales y farmacéuticos que no se eliminan fácilmente con tratamientos convencionales [49].

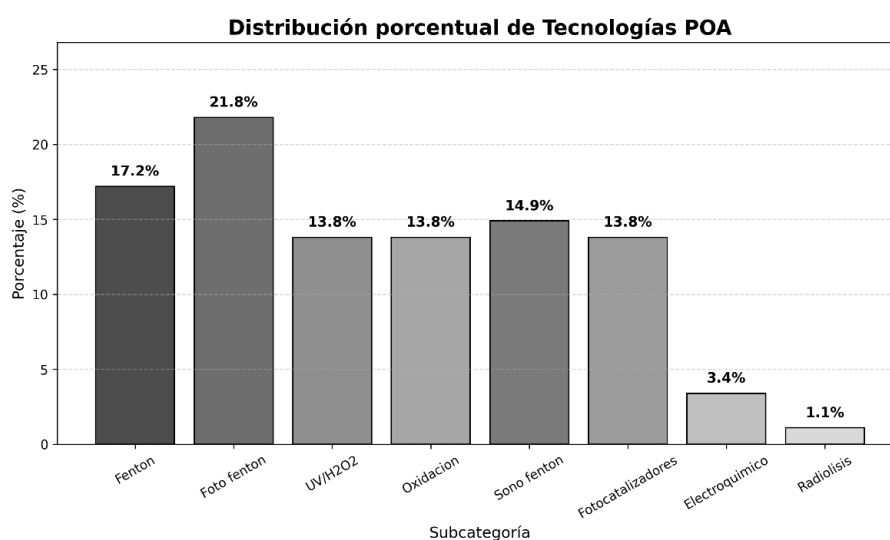
En la figura 5 se observa que el proceso Sono-Fenton (14,9%), junto con UV/H₂O₂, oxidación y fotocatalizadores (13,8% cada uno), presentan una participación importante, debido a su capacidad para mejorar la eliminación de contaminantes complejos y contribuir a

una mayor purificación del agua. Por otro lado, los procesos electroquímicos (3,4%) y la radiólisis (1,1%) muestran un menor uso, lo cual puede atribuirse principalmente a sus mayores costos y a la complejidad de su aplicación.

En general, los porcentajes reflejan que las tecnologías más empleadas son aquellas que ofrecen un adecuado equilibrio entre eficiencia y facilidad de implementación. Esto demuestra que los POA constituyen herramientas clave para la reducción de la contaminación del agua y el mejoramiento de su calidad, siendo especialmente relevantes en el tratamiento de aguas residuales industriales y en la eliminación de contaminantes persistentes.

Figura 5.

Tecnologías identificadas de los POA



Nota. Elaboración propia.

Los resultados muestran que el proceso Foto-Fenton fue la tecnología reportada con mayor frecuencia, representando 21,8 % de las investigaciones analizadas, seguido por el proceso Fenton, con 17,2 %. Estos resultados evidencian el interés creciente por estas tecnologías debido a su elevada capacidad para degradar compuestos orgánicos persistentes que difícilmente son eliminados mediante tratamientos convencionales, incluyendo residuos farmacéuticos, pesticidas y otros contaminantes emergentes [49].

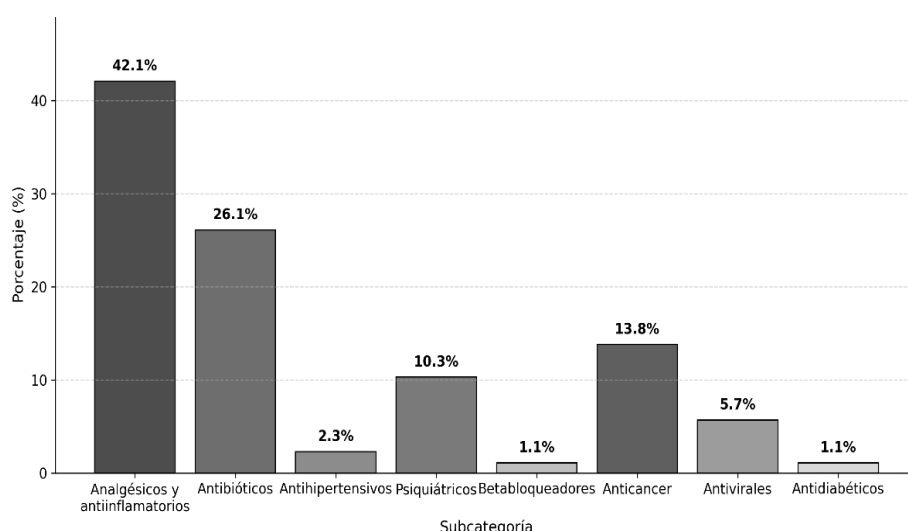
Otras tecnologías, como Sono-Fenton (14,9 %), UV/H₂O₂ y fotocátalisis (13,8 % cada una), también presentaron una participación importante dentro de la literatura científica revisada. Su aplicación se relaciona principalmente con el incremento en la producción de especies oxidantes altamente reactivas, lo que favorece la degradación de contaminantes complejos y mejora la eficiencia de los tratamientos terciarios. En contraste, los procesos

electroquímicos (3,4 %) y la radiólisis (1,1 %) fueron reportados con menor frecuencia, situación que puede asociarse a mayores costos de operación, requerimientos energéticos y una implementación más compleja a escala práctica.

En conjunto, la distribución observada refleja que las tecnologías más estudiadas son aquellas que combinan una alta eficiencia de remoción con condiciones de operación relativamente sencillas, consolidando a los procesos de oxidación avanzada como alternativas ampliamente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales con presencia de contaminantes persistentes.

Figura 6.

Tipos de CEF tratados mediante POA



Nota. Elaboración propia.

La clasificación de los contaminantes evaluados en los estudios revisados evidencia que los analgésicos, antiinflamatorios y antibióticos representan más del 65 % del total de compuestos investigados. Esta tendencia puede explicarse por el elevado consumo de estos medicamentos tanto en instituciones hospitalarias como en la población general, lo que incrementa su presencia en las aguas residuales y, posteriormente, en los cuerpos de agua receptores.

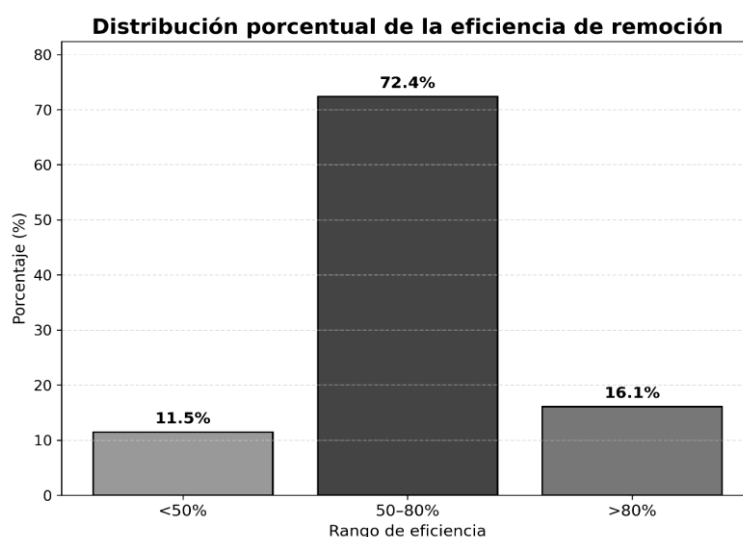
En menor proporción se identificaron medicamentos pertenecientes a grupos terapéuticos como los anticancerígenos (13,8 %), fármacos psiquiátricos (10,3 %) y antivirales (5,7 %). Aunque estos compuestos aparecen con menor frecuencia, diversos estudios señalan que poseen una elevada actividad biológica y pueden ocasionar efectos eco toxicológicos incluso cuando se encuentran en concentraciones muy bajas [50].

La presencia continua de estos contaminantes favorece procesos como el desarrollo de resistencia bacteriana, alteraciones fisiológicas en organismos acuáticos y modificaciones en la composición del microbiota presente en los ecosistemas. En consecuencia, los resultados obtenidos durante la revisión sistemática respaldan la necesidad de fortalecer los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías capaces de remover este tipo de sustancias antes de su liberación al ambiente.

Por último, en la figura 7 considerando que más del 65% de los contaminantes presentes corresponden a compuestos altamente degradables mediante POA, especialmente foto-fenton asistido por radiación UV, se logra identificar eficiencias globales superiores al 70% permitiendo la degradación de compuestos recalcitrantes, la reducción de la toxicidad y el cumplimiento de estándares más estrictos de calidad del agua. Representando así una alternativa tecnológica altamente eficiente, viable y sostenible como tratamiento terciario o avanzado en aguas residuales hospitalarias y municipales, contribuyendo significativamente a la protección de los ecosistemas acuáticos, la salud pública y la sostenibilidad de los sistemas modernos de tratamiento de aguas residuales.

Figura 7.

Eficiencias de remoción encontradas dentro de los estudios POA



Nota. Elaboración propia.

Los estudios analizados muestran que una proporción importante de los contaminantes farmacéuticos evaluados alcanza eficiencias de degradación superiores al 70 %, especialmente cuando se emplean procesos Foto-Fenton asistidos por radiación ultravioleta. Estos resultados demuestran la capacidad de esta tecnología para transformar compuestos recalcitrantes, reducir

la toxicidad del efluente y contribuir al cumplimiento de criterios más estrictos de calidad del agua.

La elevada eficiencia observada se relaciona con la generación continua de radicales hidroxilos, especies altamente oxidantes responsables de la degradación progresiva de los contaminantes orgánicos hasta alcanzar, en algunos casos, su mineralización parcial o completa. Aunque grupos farmacológicos como antihipertensivos, antidiabéticos y betabloqueadores representaron una menor proporción dentro de la literatura analizada, su tratamiento continúa siendo relevante debido a su persistencia y a la descarga constante hacia los sistemas acuáticos [51].

La evidencia recopilada durante la revisión sistemática permitió concluir que el proceso Foto-Fenton constituye la alternativa más prometedora entre las tecnologías de oxidación avanzada evaluadas, al combinar elevados porcentajes de remoción con condiciones operativas relativamente simples y una amplia aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales hospitalarias.

Estos resultados coinciden con investigaciones recientes desarrolladas sobre fármacos de alto consumo, como el acetaminofén (ACETA) y el tramadol (TML). Giménez et al. (2024) reportaron eficiencias de degradación superiores al 98 % para acetaminofén mediante un sistema Foto-Fenton con ferrioxalato y dosificación controlada de peróxido de hidrógeno, operando a pH cercano a la neutralidad y logrando además una reducción significativa de la demanda química de oxígeno [52].

De manera similar, Seraghni et al. (2018) demostraron que un sistema Foto-Fenton homogéneo basado en ferrioxalato y radiación UVA permitió obtener una rápida degradación y mineralización del tramadol bajo condiciones ácidas (pH entre 2 y 3). Estos resultados confirman que la combinación de hierro, peróxido de hidrógeno y radiación constituye una de las estrategias más eficientes para la eliminación de contaminantes farmacéuticos persistentes, alcanzando porcentajes de degradación superiores al 80 % en tiempos de reacción relativamente cortos [53].

Otros estudios también han documentado resultados satisfactorios en la remoción de ciprofloxacino, acetaminofén y tramadol, destacando la facilidad de implementación del proceso tanto en sistemas de laboratorio como a escala piloto, así como sus bajos requerimientos de infraestructura y reactivos en comparación con otras tecnologías avanzadas [54].

En conjunto, la evidencia científica recopilada permitió seleccionar el proceso Foto-Fenton como la tecnología de tratamiento para el desarrollo de esta investigación, debido a su elevada eficiencia en la degradación de contaminantes farmacéuticos, su flexibilidad operativa y la posibilidad de adaptar sus condiciones de funcionamiento a diferentes escalas de aplicación [55]. La literatura coincide en que el mejor desempeño del proceso se alcanza utilizando pH cercano a 3, sales de hierro como catalizador y peróxido de hidrógeno como agente oxidante, condiciones que favorecen la formación continua de radicales hidroxilos responsables de la oxidación de los contaminantes [56].

Finalmente, los estudios revisados demuestran que el proceso Foto-Fenton mantiene una alta eficiencia frente a antibióticos, analgésicos y antiinflamatorios, alcanzando porcentajes de remoción cercanos al 96 % para compuestos como el ciprofloxacino cuando se emplean catalizadores basados en óxidos de hierro bajo condiciones óptimas de operación [53], [54], [55]–[56]. Estos antecedentes respaldan la selección de esta tecnología como alternativa para el tratamiento de aguas residuales hospitalarias y sustentan su aplicación en la presente investigación.

4.2.2. Actividad 2. Dimensionamiento del prototipo del sistema de tratamiento

El dimensionamiento del prototipo se realizó considerando las condiciones reales de operación identificadas durante la caracterización del agua residual hospitalaria. Como criterio de diseño se tomó el caudal máximo registrado durante la fase de muestreo, equivalente a 4,16 L/s, con el propósito de desarrollar un sistema que representara adecuadamente las condiciones de operación previstas para el proceso de tratamiento.

Para seleccionar el diámetro del reactor se evaluaron dos alternativas constructivas, correspondientes a tuberías de 4 pulgadas y 6 pulgadas. El cálculo del volumen útil se efectuó mediante la Ecuación 3, obteniéndose capacidades aproximadas de 3,3 L y 7,3 L, respectivamente. El reactor de 6 pulgadas fue finalmente seleccionado debido a que proporciona un volumen suficiente para operar bajo las condiciones hidráulicas establecidas, permitiendo además un mejor desempeño durante las pruebas experimentales.

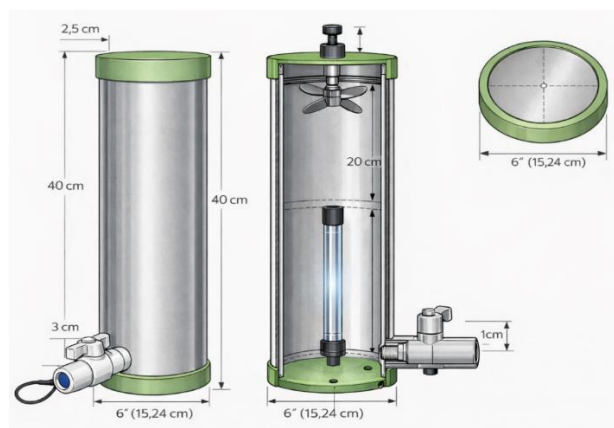
Las dimensiones y especificaciones técnicas del prototipo se presentan en la Tabla 6, donde se resumen los principales componentes utilizados en la construcción del sistema. De manera complementaria, la Figura 8 muestra los planos del reactor desde sus vistas frontal, lateral y superior, permitiendo visualizar la distribución de cada uno de sus elementos constructivos.

Tabla 6*Dimensiones del prototipo.*

Dimensiones del prototipo					
Descripción	Material	Cantidad	Dimensión		Unidad de medida
Reactor	Tuvo PVC	1	Diámetro	6"	Pulgadas
			Altura	40 cm	Centímetros
			Volumen	7300 cm ³	Centímetros cúbicos
	Tapón de prueba	2	Diámetro	6"	Pulgadas
			Altura	2,5 cm	Centímetros
			Volumen	456 cm ³	Centímetros cúbicos
	Válvulas de salida	2	Diámetro	1 y 3 cm	Centímetros
Fuente de luz	Lámpara UV	1	Diámetro	2 cm	Centímetros
			Altura	24 cm	Centímetros
			Volumen	75,4 cm ³	Centímetros cúbicos
Fuente de agitación	Motor eléctrico monofásico	1	Potencia	186W	Watts
Soporte	Varillas de hierro	3	Diámetro	1/4"	Pulgadas

Nota. Elaboración propia.

El diseño del reactor fue adaptado a partir de la propuesta desarrollada por Escobar Tovar *et al.* [60], quienes describen un sistema para procesos Foto-Fenton construido en PVC. Sobre esta base se realizaron modificaciones orientadas a mejorar la distribución de la radiación ultravioleta y facilitar la operación del sistema bajo condiciones de laboratorio, manteniendo la simplicidad constructiva y la viabilidad económica del prototipo [60].

Figura 8.*Planos del diseño del reactor tipo foto-fenton a 3 caras (frontal, plana y lateral)**Nota.* Elaboración propia con ayuda de la IA generativa ChatGPT.

4.2.3. Actividad 3. Construcción y puesta en marcha del sistema

Con base en las especificaciones definidas durante el dimensionamiento, se procedió a la construcción del prototipo experimental. El reactor fue elaborado utilizando tubería de PVC, material ampliamente empleado en sistemas de tratamiento a escala de laboratorio debido a su resistencia química, facilidad de mecanizado y bajo costo de fabricación [61].

Como modificación respecto al diseño de referencia, la superficie externa del reactor fue recubierta con una película de acabado plateado cuyo propósito fue disminuir la absorción de radiación ultravioleta por parte del PVC y favorecer el aprovechamiento de la energía luminosa dentro del sistema. Asimismo, se instalaron tapas de inspección en ambos extremos del reactor. La tapa inferior fue acondicionada con un orificio destinado al drenaje del efluente tratado, mientras que la superior permitió el acoplamiento del sistema de agitación. Adicionalmente, se incorporó una válvula lateral de mayor diámetro para facilitar las operaciones de descarga y limpieza del equipo.

Figura 9.

Collage de la estructura del reactor donde se evidencia completo, parte inferior y superior



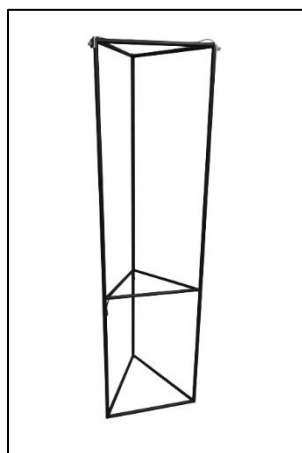
Nota. Elaboración propia

Para soportar el reactor se construyó una estructura metálica con configuración triangular utilizando varilla de $\frac{1}{4}$ de pulgada. Esta geometría proporciona una distribución uniforme de la carga y mejora la estabilidad mecánica del sistema durante su operación, reduciendo la posibilidad de deformaciones o vibraciones ocasionadas por el funcionamiento del agitador [62].

Además de incrementar la estabilidad estructural, esta configuración requiere una menor cantidad de material respecto a soportes de geometría cuadrada, disminuyendo tanto el peso como el costo de fabricación sin comprometer la resistencia del conjunto [63]. Otro aspecto favorable es el espacio libre que deja alrededor del reactor, facilitando las actividades de operación, mantenimiento y limpieza del sistema [64].

Figura 10.

Estructura del metal como soporte del reactor



Nota. Figura tomada en el laboratorio de Ciencias ambientales de la Uniautónoma del Cauca

Con el propósito de garantizar una adecuada mezcla de los reactivos durante el proceso Foto-Fenton, el sistema fue equipado con un motor eléctrico monofásico de 186 W, acoplado a un impulsor tipo hélice. Este mecanismo favorece la homogenización del medio reaccionante, evitando gradientes de concentración y mejorando la transferencia de masa dentro del reactor.

La agitación continua incrementa el contacto entre el contaminante, el peróxido de hidrógeno y el hierro catalítico, favoreciendo la formación de radicales hidroxilos y aumentando la eficiencia del proceso de oxidación avanzada. Además, contribuye a mantener el hierro en suspensión, disminuyendo su precipitación y favoreciendo la estabilidad del sistema durante toda la reacción [65]–[66].

Figura 11.

Motor eléctrico monofásico como sistema de agitación



Nota. Figura tomada en el laboratorio de Ciencias ambientales de la Uniautónoma del Cauca.

El sistema también incorpora una lámpara UV/VIS de 13 W protegida mediante un tubo de cuarzo, material seleccionado por su elevada transmitancia a la radiación ultravioleta y su resistencia a las condiciones de operación del proceso Foto-Fenton [67].

La utilización de una fuente artificial de radiación permite mantener una intensidad luminosa constante durante toda la experimentación, eliminando la influencia de factores externos como las condiciones climáticas o la variación de la radiación solar. Esta condición mejora la reproducibilidad de los ensayos y favorece la regeneración del hierro ferroso (Fe^{2+}), incrementando la producción de radicales hidroxilos responsables de la degradación de los contaminantes farmacéuticos [68].

Figura 12.

Lámpara UV/VIS CON 13W adaptada en la parte inferior del sistema



Nota. Figura tomada en el laboratorio de Ciencias ambientales de la Uniautónoma del Cauca.

Finalmente, la Figura 13 presenta el prototipo completamente ensamblado. El sistema posee una capacidad útil aproximada de 7,3 L, incorpora una válvula lateral para la descarga del efluente tratado y un sistema inferior de drenaje que facilita el vaciado del reactor una vez finalizado cada ensayo.

Durante la operación, el agua residual ocupa el espacio comprendido entre la pared interna del reactor y la lámpara UV, donde permanece sometida simultáneamente a irradiación y agitación continua durante el tiempo de reacción establecido. Bajo estas condiciones, el peróxido de hidrógeno actúa como precursor de radicales hidroxilos, mientras que el sistema $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ cumple la función de catalizador. La radiación ultravioleta favorece la regeneración del hierro ferroso, incrementando la producción de especies oxidantes responsables de la degradación de compuestos farmacéuticos como tramadol y acetaminofén, proceso que puede conducir incluso a su mineralización parcial o total, tal como ha sido reportado en investigaciones recientes [69], [70].

Figura 13.

Prototipo terminado



Nota. Figura tomada en el laboratorio de ingenierías de la Uniautónoma del Cauca.

4.3. Fase 3. Estimación de la eficacia del sistema de oxidación avanzada para la remoción de contaminantes emergentes farmacéuticos de mayor uso

4.3.1. Actividad 1. Diseño experimental

Con el propósito de evaluar la influencia de las principales variables operacionales sobre la degradación de contaminantes emergentes farmacéuticos, se implementó un diseño experimental factorial completo (3^3). Este diseño permitió analizar simultáneamente el efecto

de la concentración de hierro (Fe^{2+}), la concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el tiempo de reacción, así como las posibles interacciones entre estos factores durante el proceso Foto-Fenton.

Cada variable fue evaluada en tres niveles codificados (-1, 0 y 1), definidos a partir de la información recopilada durante la revisión bibliográfica y de las condiciones reportadas con mayor frecuencia en investigaciones relacionadas con la degradación de contaminantes farmacéuticos mediante procesos de oxidación avanzada. La variable de respuesta seleccionada correspondió al porcentaje de degradación (%DEG), calculado a partir de la diferencia entre las concentraciones inicial y final de cada compuesto analizado.

La combinación de los niveles establecidos para cada factor permitió construir la matriz experimental utilizada en los ensayos, la cual sirvió como base para evaluar el comportamiento del proceso Foto-Fenton frente a los dos contaminantes seleccionados: tramadol (TML) y acetaminofén (ACETA). De esta manera, fue posible identificar las condiciones de operación que favorecieron una mayor eficiencia de degradación.

Tabla 7

Niveles y factores utilizados para el diseño experimental.

Factor	Niveles		
	-1	0	1
[Fe]	10	20	30
[H ₂ O ₂]	35	70	105
T	60	90	120

Nota. Elaboración propia

Los experimentos fueron desarrollados bajo condiciones controladas de laboratorio utilizando un sistema batch, manteniendo constantes las variables no incluidas dentro del diseño factorial con el fin de garantizar que las diferencias observadas en el porcentaje de degradación estuvieran asociadas únicamente a los factores evaluados.

Posteriormente, los resultados experimentales fueron analizados mediante un modelo de superficie de respuesta (Response Surface Methodology, RSM) implementado en el software R versión 4.5.1. Esta metodología permitió evaluar el comportamiento conjunto de las variables independientes, identificar posibles efectos de interacción y estimar las condiciones de operación que maximizan la eficiencia del proceso Foto-Fenton.

Como parte del análisis estadístico también se verificaron los supuestos del modelo. En primer lugar, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los datos, complementando este análisis mediante histogramas y gráficos de probabilidad normal (Q-Q Plot). Posteriormente, la homogeneidad de las varianzas fue analizada mediante la prueba de Levene, cuyos resultados fueron apoyados con diagramas de caja para facilitar la interpretación de la variabilidad entre tratamientos.

Debido a que algunos conjuntos de datos no cumplieron simultáneamente los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, las comparaciones entre los diferentes niveles experimentales se realizaron utilizando la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, permitiendo identificar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos sin asumir una distribución normal de los datos.

La aplicación conjunta del diseño factorial, la metodología de superficie de respuesta y las pruebas estadísticas permitió evaluar de manera integral el desempeño del proceso Foto-Fenton y establecer las condiciones experimentales con mayor potencial para la degradación de los contaminantes farmacéuticos objeto de estudio.

4.3.1.1. Resultados del diseño experimental para la degradación de tramadol (TML)

Los resultados obtenidos para el proceso Foto-Fenton aplicado al tramadol (TML) se presentan en la Tabla 8, donde se muestran las diferentes combinaciones de concentración de hierro (Fe^{2+}), concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y tiempo de reacción evaluadas mediante el diseño factorial 3^3 , así como el porcentaje de degradación alcanzado en cada tratamiento.

Tabla 8

Diseño experimental del POA Foto-fenton con TML.

[Fe] (M)	[H ₂ O ₂] (M)	t (min)	%DEG
30	70	90	19,1
30	105	60	24,2
10	105	90	68,2
30	105	60	33,6
30	35	60	43,7
10	105	60	52,2
20	105	60	54,8

10	70	90	67,7
30	35	90	42,7
20	70	90	39,4
10	35	60	54,5
20	35	90	33,5
30	70	120	4,6
10	35	120	60,3
30	105	120	14,2
10	70	60	57,5
20	105	90	65,1
10	35	90	71,6
20	70	60	16,9
30	35	120	15,2
20	35	60	14,4
20	70	120	9,6
10	105	120	71,8
20	35	120	56
20	105	120	13,4
10	70	120	40,9
30	105	90	16,2

Nota. Elaboración propia

Los porcentajes de degradación obtenidos oscilaron entre 4,6 % y 71,8 %, evidenciando una respuesta altamente dependiente de las condiciones de operación. Esta variabilidad confirma que la eficiencia del proceso Foto-Fenton está controlada por la interacción entre la concentración del catalizador, la cantidad de agente oxidante y el tiempo disponible para el desarrollo de las reacciones de oxidación.

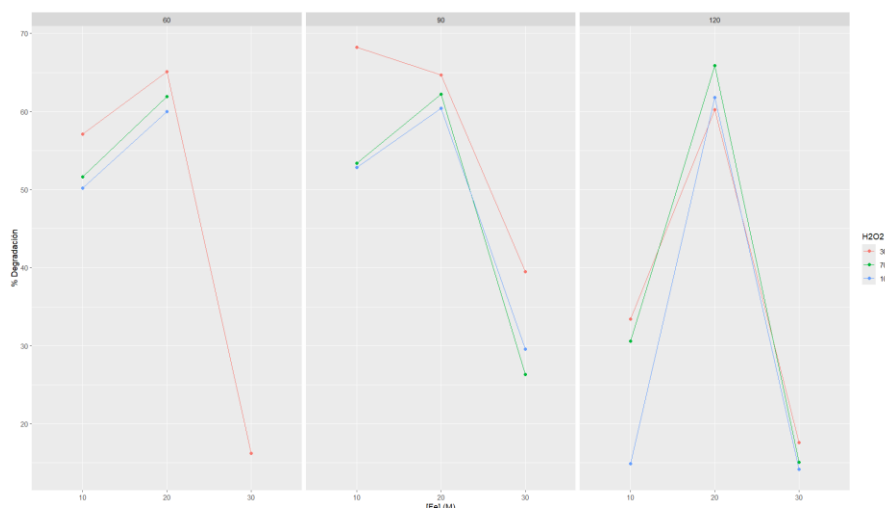
Los mayores porcentajes de degradación se registraron cuando el sistema operó con 10 mg/L de hierro, 105 mg/L de H₂O₂ y tiempos de reacción comprendidos entre 90 y 120 minutos, alcanzando eficiencias cercanas al 72 %. En contraste, las menores respuestas se obtuvieron con concentraciones elevadas de hierro y tiempos prolongados, lo que sugiere una disminución en la eficiencia del proceso bajo estas condiciones.

Este comportamiento puede explicarse por el mecanismo propio de la reacción Foto-Fenton. Cuando la concentración de hierro supera el nivel óptimo, parte de los radicales hidroxilos generados reaccionan con el exceso de Fe²⁺ en lugar de atacar las moléculas del contaminante, reduciendo la cantidad de especies oxidantes disponibles para el proceso de degradación. Como consecuencia, el incremento del catalizador no siempre se traduce en una mayor eficiencia del tratamiento.

La interacción entre las variables evaluadas se presenta en la Figura 14, donde se analiza el efecto conjunto de la concentración de hierro y del peróxido de hidrógeno para tres tiempos de reacción (60, 90 y 120 minutos).

Figura 14.

Interacción de Fe: H₂O₂ en niveles de tiempo con TML en solución acuosa.



Nota. Elaboración propia con ayuda de Origin Lab

A los 60 minutos, el incremento en la concentración de H₂O₂ produjo un aumento progresivo del porcentaje de degradación, especialmente cuando el sistema operó con bajas concentraciones de hierro. Este comportamiento indica que, durante las etapas iniciales del proceso, la disponibilidad del agente oxidante constituye uno de los factores más importantes para favorecer la formación de radicales hidroxilos.

Cuando el tiempo de reacción aumentó a 90 minutos, la diferencia entre las curvas se hizo más evidente, indicando una interacción más marcada entre ambos reactivos. Bajo estas condiciones se alcanzaron los mayores porcentajes de degradación, lo que demuestra que la relación entre hierro y peróxido de hidrógeno adquiere un papel determinante en la eficiencia global del proceso.

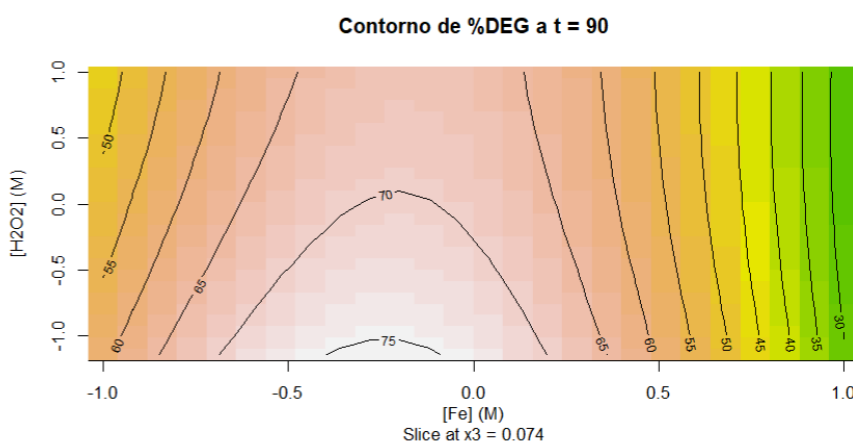
Por el contrario, a los 120 minutos se observó una tendencia hacia la estabilización del sistema. El aumento adicional de la concentración de H₂O₂ no produjo incrementos significativos en la degradación del contaminante, comportamiento que puede asociarse al consumo progresivo del oxidante o a la formación de especies intermedias menos reactivas frente a los radicales hidroxilos.

En conjunto, estos resultados muestran que el proceso Foto-Fenton responde de manera no lineal a las condiciones experimentales y que existe una combinación específica de reactivos capaz de maximizar la degradación del tramadol.

Análisis mediante superficie de respuesta. Con el propósito de identificar la región de mayor eficiencia del proceso, los resultados experimentales fueron analizados mediante un modelo de superficie de respuesta (RSM). La representación obtenida se presenta en la Figura 15, donde se relaciona el porcentaje de degradación con las concentraciones de hierro y peróxido de hidrógeno manteniendo constante el tiempo de reacción en 90 minutos.

Figura 15.

Interacción de Fe: H₂O₂ en niveles de tiempo con TML en solución acuosa



Nota. Elaboración propia con ayuda de Origin Lab.

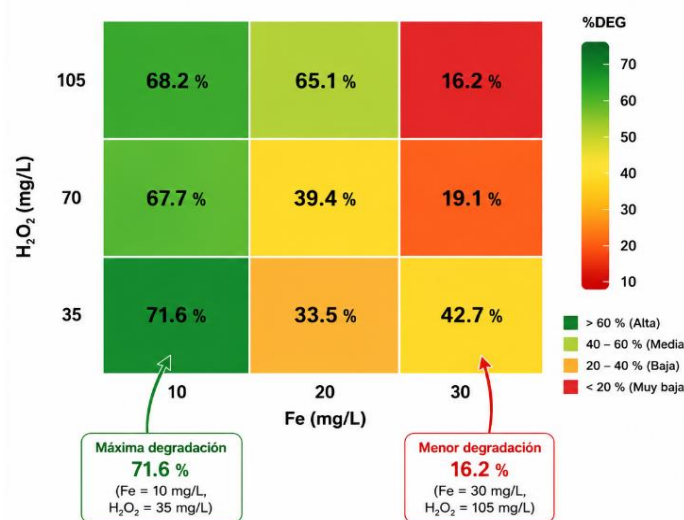
El diagrama de contorno evidencia una región claramente definida donde el porcentaje de degradación supera el 70 %, localizada en condiciones de bajas concentraciones de hierro y altas concentraciones de H₂O₂. La curvatura de las isolíneas confirma que la respuesta del sistema no presenta un comportamiento lineal, sino que depende de la interacción simultánea entre ambas variables.

La distribución observada valida la utilización de un modelo cuadrático para describir el proceso y permite identificar una zona de operación donde la generación de radicales hidroxilo resulta más eficiente. Por el contrario, cuando ambos reactivos se encuentran en concentraciones bajas, el porcentaje de degradación disminuye considerablemente, indicando que la producción de especies oxidantes es insuficiente para favorecer la degradación del contaminante.

Influencia de la concentración de hierro. La Figura 16 muestra el efecto de la concentración de hierro sobre el porcentaje de degradación cuando el tiempo de reacción permanece constante en 90 minutos.

Figura 16.

Gráfico de contorno del porcentaje de degradación (%DEG) en función de la concentración de hierro a 90 minutos de reacción



Nota. Elaboración propia con ayuda de Origin Lab.

Los resultados muestran que el incremento de la concentración de hierro no genera un aumento continuo de la eficiencia del proceso. Aunque el hierro actúa como catalizador indispensable para la producción de radicales hidroxilo, concentraciones excesivas favorecen reacciones secundarias en las que dichas especies oxidantes son consumidas antes de reaccionar con el contaminante.

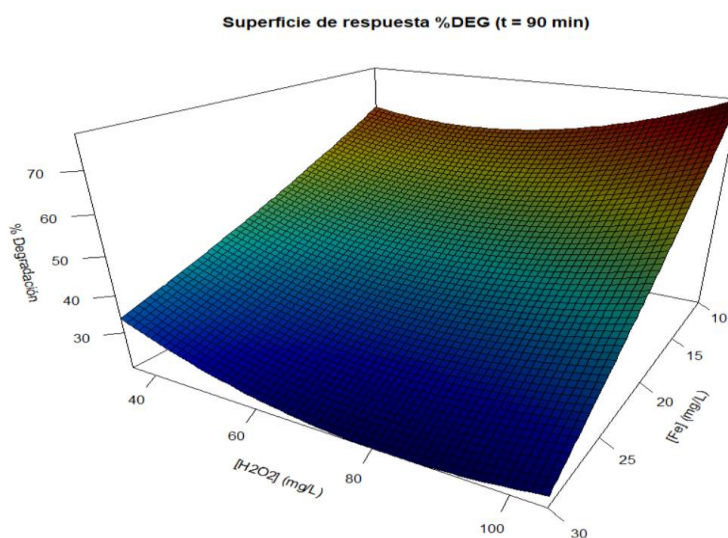
En consecuencia, los mayores porcentajes de degradación se obtuvieron utilizando la menor concentración de hierro evaluada (10 mg/L), condición que permitió un mejor aprovechamiento del peróxido de hidrógeno y una mayor disponibilidad de radicales hidroxilos para la oxidación del tramadol.

Este comportamiento coincide con lo reportado en investigaciones recientes sobre procesos Foto-Fenton, donde se demuestra que el exceso de hierro reduce la eficiencia global del tratamiento debido a fenómenos de recombinación y consumo no productivo de especies reactivas.

Modelo de superficie de respuesta. La representación tridimensional del modelo ajustado se presenta en la Figura 17, donde se observa el comportamiento conjunto del porcentaje de degradación en función de las concentraciones de hierro y peróxido de hidrógeno.

Figura 17.

Superficie de respuesta del porcentaje de degradación (%DEG) del proceso Foto-Fenton a un tiempo de reacción de 90 min.



Nota. Elaboración propia con ayuda de Origin Lab.

La superficie obtenida evidencia un comportamiento característico de un modelo cuadrático, confirmando la existencia de efectos de interacción entre ambas variables experimentales. La región de mayor respuesta se localiza en condiciones de baja concentración de hierro y alta concentración de H₂O₂, donde el porcentaje de degradación alcanza valores cercanos al 75 %.

El modelo ajustado se expresa mediante la siguiente ecuación: $\%DEG = 118.00 + 1.43 \cdot Fe - 1.915 \cdot H_2O_2 + 0.0267 \cdot Fe \cdot H_2O_2 - 0.1175 \cdot Fe^2 + 0.01159 \cdot H_2O_2^2$

La calidad del ajuste confirma que el modelo describe adecuadamente el comportamiento experimental dentro del intervalo evaluado y permite estimar las condiciones de operación que favorecen la degradación del tramadol mediante el proceso Foto-Fenton.

En términos generales, el análisis estadístico demuestra que la concentración de hierro constituye el factor con mayor influencia sobre la respuesta del sistema, seguida por la concentración de peróxido de hidrógeno y la interacción entre ambas variables. Asimismo, el comportamiento observado confirma que la optimización del proceso no depende del

incremento indiscriminado de los reactivos, sino del equilibrio adecuado entre el catalizador, el agente oxidante y el tiempo de reacción.

4.3.1.2. Resultados del diseño experimental para la degradación de ACETA

Los resultados obtenidos para la degradación del ACETA mediante el proceso Foto-Fenton se presentan en la Tabla 9, donde se muestran las diferentes combinaciones de concentración de hierro (Fe^{2+}), concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y tiempo de reacción evaluadas dentro del diseño factorial 3^3 , junto con el porcentaje de degradación alcanzado en cada ensayo.

Tabla 9

Diseño experimental del POA Foto-fenton con ACETA.

[Fe] (M)	[H ₂ O ₂] (M)	t (min)	%DEG
30	70	90	24,4
30	105	60	56,6
10	105	90	69,6
30	105	60	49,9
30	35	60	49,5
10	105	60	81,6
20	105	60	77,6
10	70	90	73,1
30	35	90	35,6
20	70	90	58,5
10	35	60	73
20	35	90	65,8
30	70	120	49,6
10	35	120	56,3
30	105	120	63,4
10	70	60	61,3
20	105	90	83,6
10	35	90	71,8
20	70	60	51,4
30	35	120	47,2
20	35	60	65,1
20	70	120	52,2
10	105	120	72
20	35	120	64,3
20	105	120	61,1
10	70	120	51,2
30	105	90	70,8

Nota. Elaboración propia

Los porcentajes de degradación obtenidos variaron entre 24,4 % y 83,6 %, evidenciando que la eficiencia del proceso depende directamente de las condiciones de operación establecidas para cada tratamiento. Esta amplitud en los resultados confirma que la degradación del ACETA está influenciada por la interacción simultánea entre el catalizador, el agente oxidante y el tiempo de reacción, comportamiento característico de los procesos de oxidación avanzada.

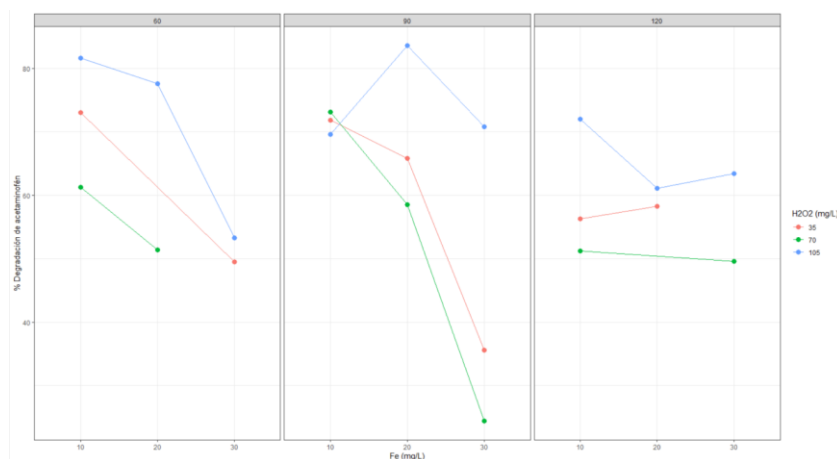
El mayor porcentaje de degradación (83,6 %) se obtuvo empleando una concentración intermedia de hierro (20 mg/L), una concentración elevada de H_2O_2 (105 mg/L) y un tiempo de reacción de 90 minutos. En contraste, las menores eficiencias se registraron cuando el sistema operó con la mayor concentración de hierro (30 mg/L) y niveles intermedios de peróxido de hidrógeno, lo que evidencia que un incremento del catalizador no garantiza necesariamente un mejor desempeño del proceso.

Este comportamiento puede atribuirse a que concentraciones excesivas de hierro favorecen reacciones secundarias en las cuales parte de los radicales hidroxilos son consumidos antes de reaccionar con el contaminante, reduciendo la disponibilidad de especies oxidantes responsables de la degradación del ACETA.

Interacción entre Fe^{2+} , H_2O_2 y tiempo de reacción. La interacción entre las variables experimentales se presenta en la Figura 18, donde se analiza el efecto conjunto de las concentraciones de hierro y peróxido de hidrógeno para tiempos de reacción de 60, 90 y 120 minutos.

Figura 18.

Interacción de Fe: H_2O_2 en niveles de tiempo con ACETA en solución acuosa



Nota. Elaboración propia con ayuda de Origin Lab.

Durante los primeros 60 minutos se observó un incremento progresivo del porcentaje de degradación a medida que aumentó la concentración de H_2O_2 , especialmente cuando el sistema operó con bajas concentraciones de hierro. Este comportamiento evidencia que, en las etapas iniciales del proceso, la disponibilidad del agente oxidante constituye uno de los factores determinantes para la formación de radicales hidroxilos.

A los 90 minutos se alcanzaron los mayores porcentajes de degradación, identificándose una interacción más evidente entre ambas variables. Bajo estas condiciones, concentraciones intermedias de hierro combinadas con niveles elevados de H_2O_2 favorecieron la generación continua de especies oxidantes, permitiendo obtener las mayores eficiencias de remoción del ACETA.

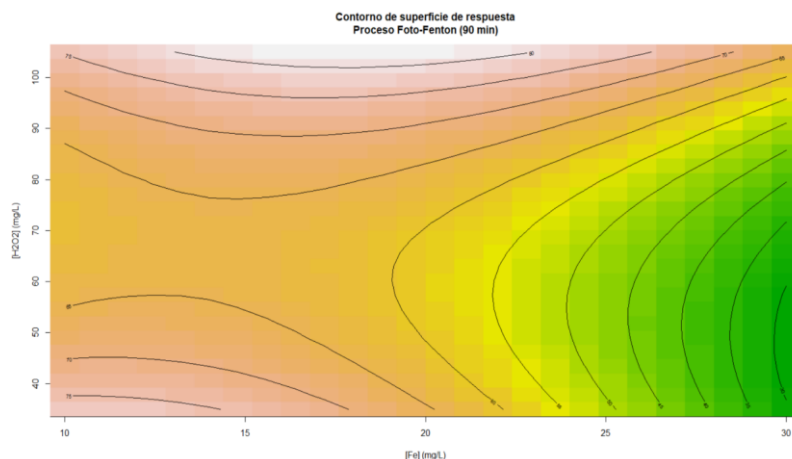
Cuando el tiempo de reacción aumentó hasta 120 minutos, el sistema mostró una tendencia hacia la estabilización, observándose que incrementos adicionales en el tiempo o en la concentración de los reactivos no produjeron mejoras significativas en la degradación. Este comportamiento puede relacionarse con el agotamiento progresivo del peróxido de hidrógeno o con la formación de compuestos intermedios de mayor resistencia a la oxidación.

En conjunto, estos resultados demuestran que la eficiencia del proceso Foto-Fenton depende del equilibrio entre las concentraciones del catalizador y del oxidante, así como del tiempo disponible para el desarrollo de las reacciones fotoquímicas.

Análisis mediante superficie de respuesta. La Figura 19 presenta el diagrama de contorno obtenido mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM), donde se representa la variación del porcentaje de degradación del ACETA en función de las concentraciones de hierro y peróxido de hidrógeno, manteniendo constante el tiempo de reacción en 90 minutos.

Figura 19.

Contorno de %DEG a $t=90$ min Interacción de Fe: H_2O_2 con ACETA en solución acuosa.



Nota. Elaboración propia con ayuda de Origin Lab

En la figura 19, se muestra el contorno de superficie de respuesta del proceso Foto-fenton a los 90 min de reacción, donde se evidencia una influencia simultanea de la concentración de Fe y H_2O_2 sobre el %DEG del ACETA en sln acuosa. La representación gráfica, obtenida a partir del modelo cuadrático ajustado mediante superficie de respuesta En la Figura 19 se presenta el diagrama de contorno obtenido mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM) para un tiempo de reacción de 90 min, en el cual se representa el comportamiento del %DEG del ACETA en solución acuosa como función de las concentraciones de Fe y H_2O_2 . Esta representación permite identificar gráficamente la región experimental evaluada y analizar la respuesta del sistema frente a las variaciones simultáneas de ambos factores.

El comportamiento observado evidencia que la concentración de Fe ejerce una influencia significativa sobre el %DEG. Dentro del intervalo evaluado (10–30 mg/L), el incremento del catalizador favoreció el aumento de la eficiencia del proceso, alcanzándose los mayores niveles de degradación en los valores más altos de este factor. Este resultado confirma la función del hierro como catalizador en el proceso Foto-Fenton, al promover la formación de radicales hidroxilos ($\bullet OH$), especies responsables de la oxidación de los contaminantes farmacéuticos presentes en la solución.

En contraste, la respuesta obtenida para el H_2O_2 mostró un comportamiento no lineal. La mayor eficiencia del proceso se concentró en valores intermedios, cercanos a 50–70 mg/L, mientras que incrementos adicionales del oxidante no produjeron mejoras proporcionales en el

%DEG. Este comportamiento puede explicarse por la ocurrencia de reacciones secundarias en las cuales el exceso de H_2O_2 actúa como captador de radicales hidroxilos, disminuyendo la disponibilidad de estas especies para la oxidación del ACETA y reduciendo, en consecuencia, el rendimiento global del proceso.

La geometría de las líneas de contorno también evidencia una interacción importante entre las concentraciones de Fe y H_2O_2 . La disposición curvada y no paralela de las isolíneas confirma que el efecto de cada variable depende directamente del nivel del otro factor, comportamiento característico de los procesos Foto-Fenton. En estas condiciones, la eficiencia del sistema no está determinada por el incremento individual de los reactivos, sino por el equilibrio entre la concentración del catalizador y la del agente oxidante. Como resultado, la región óptima de operación se localizó alrededor de concentraciones altas de Fe y niveles intermedios de H_2O_2 , donde se obtuvieron los mayores porcentajes de degradación.

Desde el punto de vista estadístico, el modelo cuadrático de segundo orden presentó significancia global de acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA), registrando un valor de p inferior a 0,05. Este resultado demuestra que el modelo explica de manera significativa la variabilidad observada en el %DEG. Asimismo, los términos correspondientes a las concentraciones de Fe y H_2O_2 mostraron efectos estadísticamente significativos sobre la respuesta, mientras que el término de interacción Fe: H_2O_2 confirmó la influencia conjunta de ambos factores, respaldando la interpretación obtenida a partir del diagrama de contorno.

El desempeño del modelo también fue respaldado por el coeficiente de determinación (R^2), el cual evidenció un elevado grado de ajuste entre los valores experimentales y los valores predichos. Esto indica que una alta proporción de la variabilidad observada en el %DEG fue explicada por las variables independientes incluidas en el diseño experimental, confirmando la capacidad predictiva del modelo dentro del dominio evaluado.

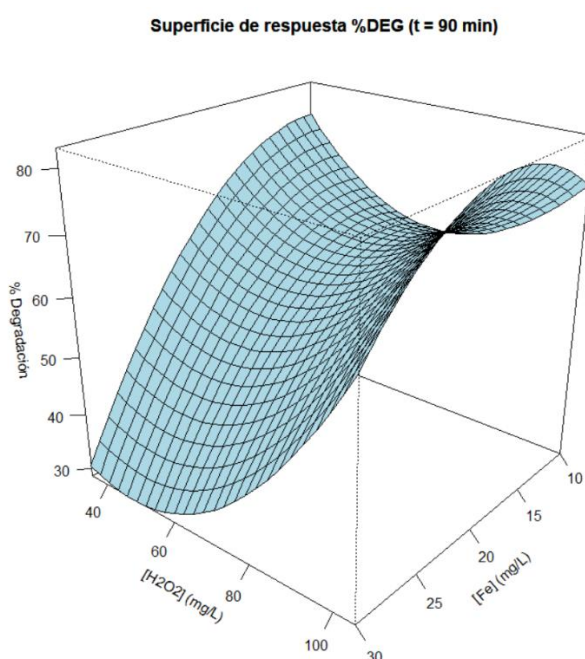
La validación de los supuestos estadísticos se realizó mediante el análisis de los residuos del modelo. La prueba de Shapiro-Wilk presentó un valor de p superior a 0,05, indicando que no existen evidencias para rechazar el supuesto de normalidad. De forma complementaria, el gráfico Q-Q mostró una distribución aproximadamente lineal de los residuos, mientras que el análisis de dispersión no evidenció patrones sistemáticos, lo que confirma la homogeneidad de las varianzas y la independencia de los errores. En conjunto, estos resultados respaldan la confiabilidad de los valores obtenidos mediante el ANOVA y demuestran la adecuada capacidad del modelo para representar el comportamiento experimental del sistema.

La Figura 20 presenta la superficie de respuesta correspondiente al %DEG del ACETA obtenido mediante el proceso Foto-Fenton para un tiempo de reacción de 90 min, en función de las concentraciones de Fe y H_2O_2 . La superficie fue ajustada mediante un modelo cuadrático de segundo orden utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM), cuya expresión matemática se presenta en la Ecuación 5.

$$\%DEG = 118.00 + 1.43Fe - 1.915H_2O_2^2 + 0.0267FeH_2O_2^2 - 0.1175Fe^2 + 0.01159H_2O_2^2 \text{ Ec. 5}$$

Figura 20.

Superficie de respuesta del porcentaje de degradación (%DEG) del proceso Foto-Fenton a un tiempo de reacción de 90 min.



Nota. Elaboración propia con ayuda de Origin Lab

La Figura 20 presenta la superficie de respuesta correspondiente al %DEG del ACETA mediante el proceso Foto-Fenton para un tiempo de reacción de 90 min, considerando como variables independientes las concentraciones de Fe y H_2O_2 . La representación tridimensional permite analizar de manera integrada el efecto de ambos factores sobre la eficiencia del proceso y definir las condiciones experimentales que favorecen una mayor degradación del contaminante.

La respuesta obtenida evidencia un comportamiento no lineal, característico de los procesos Foto-Fenton, donde la influencia de cada variable depende del nivel de la otra. La

región de mayor eficiencia se localiza con concentraciones elevadas de Fe y niveles intermedios de H_2O_2 , condiciones que favorecen la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) y, en consecuencia, incrementan la degradación del ACETA. Por el contrario, cuando la concentración de H_2O_2 supera el intervalo óptimo, el rendimiento del sistema tiende a estabilizarse e incluso a disminuir, comportamiento asociado a reacciones secundarias que consumen parte de las especies oxidantes y reducen su disponibilidad para oxidar el contaminante.

El ajuste obtenido presentó un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,8887$), indicando que el 88,87 % de la variabilidad observada en el %DEG fue explicada por las variables consideradas en el diseño experimental. Aunque el R^2 ajustado fue de 0,7031, este resultado refleja una capacidad adecuada para representar la tendencia experimental dentro del intervalo de estudio y confirma la utilidad del modelo para describir el comportamiento del proceso.

La confiabilidad del ajuste fue verificada mediante el análisis de los residuos. La prueba de Shapiro-Wilk arrojó un valor de p superior a 0,05, indicando que no existen evidencias suficientes para rechazar el supuesto de normalidad. Este resultado fue consistente con el gráfico Q-Q, en el cual los residuos se distribuyeron de manera cercana a la línea teórica. De igual forma, el análisis de dispersión no mostró patrones definidos, lo que confirma la homogeneidad de las varianzas y la independencia de los errores. En conjunto, estas pruebas respaldan la validez del modelo y la confiabilidad de las inferencias estadísticas realizadas.

La superficie generada permitió identificar una región de operación con elevados porcentajes de degradación, demostrando que la eficiencia del proceso está determinada por el equilibrio entre las concentraciones de Fe y H_2O_2 , más que por el incremento individual de cualquiera de estos reactivos. Este comportamiento confirma la necesidad de optimizar simultáneamente ambas variables para maximizar la producción de radicales hidroxilo y mejorar el desempeño del proceso Foto-Fenton en la degradación de CEF presentes en ARH.

4.3.2. Actividad 2. Cuantificación de los CEF

Con el propósito de evaluar la eficacia del proceso Foto-Fenton para la degradación de CEF de mayor uso en ARH, se realizaron ensayos experimentales utilizando como compuestos de estudio el TML y el ACETA, seleccionados por su alta frecuencia de consumo en el centro hospitalario y por la posibilidad de ser cuantificados mediante espectrofotometría UV/Vis. La evaluación del proceso se desarrolló bajo las condiciones operacionales optimizadas durante el diseño experimental, empleando Fe^{2+} como catalizador y H_2O_2 como agente oxidante en un

medio ajustado a pH 3, condiciones que favorecen la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), responsables de la degradación de compuestos orgánicos persistentes.

La eficiencia del tratamiento fue determinada mediante el seguimiento de la concentración de ambos contaminantes a lo largo del proceso, utilizando espectrofotometría UV/Vis y curvas de calibración construidas para cada compuesto. Este procedimiento permitió establecer la relación entre la absorbancia y la concentración, de acuerdo con la ley de Beer-Lambert, proporcionando una herramienta confiable para el monitoreo de la degradación durante los ensayos experimentales.

Las curvas de calibración se elaboraron a partir de soluciones patrón preparadas mediante diluciones sucesivas de compuestos comerciales de alta pureza, cubriendo un intervalo de concentraciones adecuado para cada analito. Posteriormente, las muestras obtenidas durante los ensayos fueron transferidas a cubetas de cuarzo para la medición de la absorbancia a la longitud de onda característica de cada compuesto. A partir de la ecuación de calibración se determinaron las concentraciones iniciales y finales, permitiendo calcular el porcentaje de degradación alcanzado bajo las diferentes condiciones de operación.

La selección de ACETA y TML respondió tanto a su relevancia dentro del consumo hospitalario como a las capacidades analíticas disponibles en el laboratorio. Aunque la espectrofotometría UV/Vis constituye una técnica rápida, reproducible y de fácil implementación, presenta limitaciones para la cuantificación de compuestos con estructuras químicas más complejas o presentes en bajas concentraciones. Por esta razón, sustancias como la doxiciclina requieren técnicas instrumentales de mayor sensibilidad y selectividad, como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas, ampliamente utilizada para el análisis de contaminantes farmacéuticos en matrices ambientales.

Los resultados obtenidos durante la validación experimental evidenciaron una elevada eficiencia del proceso Foto-Fenton para ambos compuestos. En las condiciones óptimas de operación, el TML alcanzó una degradación aproximada del 71,8 %, mientras que el ACETA presentó eficiencias cercanas al 85 %, respaldadas por curvas de calibración con coeficientes de determinación de $R^2 = 0,997$ y $R^2 = 0,995$, respectivamente. Estos resultados confirman la capacidad del sistema para promover la degradación de contaminantes farmacéuticos mediante la acción de radicales hidroxilo generados durante el proceso.

4.3.3. Actividad 3. Pruebas de remoción en el prototipo

Con el fin de validar el desempeño del sistema Foto-Fenton en condiciones experimentales, se realizaron pruebas de degradación utilizando el prototipo construido durante la investigación. Para ello, se emplearon las condiciones de operación que presentaron los mejores resultados durante el diseño experimental, con el propósito de verificar la respuesta del sistema frente a la remoción de ACETA y TML.

La evaluación del proceso se realizó mediante el seguimiento de la absorbancia registrada para cada compuesto a partir de las curvas de calibración previamente obtenidas. En el caso del TML, los valores de absorbancia estuvieron comprendidos entre 0,024 y 0,570, intervalo que permitió establecer una adecuada relación entre la concentración del contaminante y la respuesta del método analítico. La disminución progresiva de este parámetro durante los ensayos fue utilizada como indicador del avance del proceso de degradación.

Las pruebas experimentales se desarrollaron a escala de laboratorio utilizando 4 L de agua sintética preparados con las concentraciones iniciales de ACETA y TML definidas para cada ensayo. Posteriormente, se adicionaron 5 mg/L de Fe^{2+} como catalizador y 112 μL de H_2O_2 como agente oxidante, manteniendo el sistema bajo agitación continua y radiación UV/VIS de 13 W durante 120 min. Con el fin de evaluar la evolución del tratamiento, se tomaron muestras a los 60 y 75 min de reacción, manteniendo constantes las concentraciones de los reactivos en ambas pruebas.

Los resultados obtenidos evidenciaron una disminución progresiva de la absorbancia a medida que aumentó el tiempo de reacción, comportamiento que confirma la degradación de los contaminantes por la acción de los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) generados durante el proceso Foto-Fenton. Asimismo, la irradiación ultravioleta favoreció la regeneración del hierro ferroso, mientras que la agitación continua permitió una distribución homogénea de los reactivos, mejorando la transferencia de masa y favoreciendo la cinética de oxidación dentro del reactor.

En términos generales, el prototipo presentó un comportamiento consistente con los resultados obtenidos durante los ensayos en sistema batch, alcanzando elevadas eficiencias de degradación para ambos compuestos. Estos resultados confirman la viabilidad del sistema diseñado para la remoción de CEF y respaldan la aplicación del proceso Foto-Fenton como una alternativa para el tratamiento de ARH, en concordancia con las tendencias identificadas durante la revisión bibliográfica y con estudios previos sobre procesos de oxidación avanzada.

Figura 21.

Montaje experimental del proceso de oxidación avanzada tipo foto-fenton aplicado a la degradación de tramadol en solución acuosa, mostrando además el sistema de agitación



Nota. Elaboración propia

4.3.4. Actividad 4. Análisis de la información

El análisis integral de los resultados permitió establecer que la eficiencia del proceso Foto-Fenton está determinada por la interacción entre la concentración de Fe^{2+} , la concentración de H_2O_2 y el tiempo de reacción. La combinación de estos factores influyó directamente sobre el porcentaje de degradación alcanzado para cada compuesto, evidenciando que las condiciones óptimas de operación difieren según las características químicas del contaminante.

Para el TML, las mayores eficiencias de degradación se obtuvieron utilizando bajas concentraciones de Fe^{2+} y niveles elevados de H_2O_2 , alcanzando porcentajes de degradación superiores al 70 %. Este comportamiento puede asociarse con una mayor susceptibilidad de su estructura molecular al ataque de los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), los cuales poseen un elevado potencial oxidante y favorecen la ruptura de enlaces químicos presentes en compuestos orgánicos complejos [71].

En el caso del ACETA, las condiciones óptimas correspondieron a concentraciones intermedias de Fe^{2+} y altas concentraciones de H_2O_2 , alcanzándose eficiencias cercanas al 85 %. Aunque este compuesto mostró una elevada degradación, su comportamiento sugiere la posible formación de productos intermedios durante la oxidación, los cuales pueden disminuir la velocidad global del proceso al competir por las especies oxidantes disponibles o presentar una mayor resistencia a su transformación [72].

La confiabilidad de los resultados fue respaldada por las curvas de calibración empleadas durante la cuantificación de ambos compuestos, las cuales presentaron coeficientes de determinación superiores a 0,99, confirmando la adecuada linealidad del método espectrofotométrico y la reproducibilidad de las mediciones realizadas.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el proceso Foto-Fenton constituye una alternativa eficiente para la degradación de CEF presentes en ARH. No obstante, la eficiencia del tratamiento depende de la optimización de las condiciones de operación y de las características fisicoquímicas de cada contaminante, aspectos que deben considerarse durante el diseño y la implementación de sistemas de tratamiento basados en procesos de oxidación avanzada [73].

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se determinó que el ACETA y la doxiciclina fueron los CEF detectados en las mayores concentraciones dentro de las ARH evaluadas, registrándose valores máximos de 42,29 µg/L y 55,2 µg/L, respectivamente. Aunque el TML no fue identificado durante el análisis cromatográfico, la información suministrada por el centro hospitalario permitió establecer que corresponde a uno de los medicamentos de mayor consumo, razón por la cual fue incluido como compuesto de interés en la evaluación experimental del proceso Foto-Fenton.

Se diseñó y construyó un sistema de tratamiento basado en el proceso Foto-Fenton, tomando como referencia las condiciones operacionales identificadas durante la revisión sistemática y los criterios de diseño establecidos para el prototipo. El sistema permitió integrar adecuadamente la radiación UV/VIS, la agitación continua y la dosificación controlada de los reactivos, garantizando condiciones estables para el desarrollo del proceso de oxidación avanzada.

La evaluación experimental permitió establecer que la eficiencia del proceso Foto-Fenton depende de la interacción entre la concentración de Fe^{2+} , la concentración de H_2O_2 y el tiempo de reacción. Bajo las condiciones óptimas de operación, el sistema alcanzó eficiencias de degradación cercanas al 85 % para el ACETA y 71,8 % para el TML, confirmando la viabilidad técnica del proceso para la remoción de CEF presentes en ARH.

En términos generales, la investigación demostró que el proceso Foto-Fenton constituye una alternativa eficiente para complementar el tratamiento de ARH contaminadas con CEF, debido a su capacidad para degradar compuestos farmacéuticos de difícil eliminación mediante tratamientos convencionales, contribuyendo así a disminuir la carga contaminante descargada a los cuerpos de agua.

5.2. Recomendaciones

- Validar el proceso foto fenton utilizando agua residual hospitalaria real
- Evaluar la mineralización del contaminante, mediante parámetros como Carbono Orgánico Total (COT) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- Analizar la formación y toxicidad de los subproductos de degradación.

- Escalar el proceso a nivel piloto, evaluando su desempeño bajo condiciones reales de operación y estimando aspectos técnicos energéticos y económicos para su implementación
- Ampliar el estudio a otros contaminantes farmacéuticos emergentes presentes en aguas residuales hospitalarias.

Referencias

- [1] T. Jiang, W. Wu, M. Ma, Y. Hu, y R. Li, «Occurrence and distribution of emerging contaminants in wastewater treatment plants: A globally review over the past two decades», *Sci. Total Environ.*, vol. 951, p. 175664, nov. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175664.
- [2] M. Checa A, D. Sosa del castillo, O. Ruiz B, «Presencia de productos farmacéuticos en el agua y su impacto en el ambiente» BIONATURA, Vol 5, No 1, 2021 - 2027, doi: 10.21931/RB/2021.06.01.27.
- [3] A. Majumder, A. K. Gupta, P. S. Ghosal, y M. Varma, «A review on hospital wastewater treatment: A special emphasis on occurrence and removal of pharmaceutically active compounds, resistant microorganisms, and SARS-CoV-2», *Revista de ingeniería química ambiental*, vol. 9, n.º 2, p. 104812, abr. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2020.104812.
- [4] S. Zandaryaa, A. Fares, y G. Eckstein, «Introduction—Emerging Pollutants in Water: Threats, Challenges, and Research Needs», en *Emerging Pollutants: Protecting Water Quality for the Health of People and the Environment*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 1-7. doi: 10.1007/978-3-031-71758-1_1.
- [5] OECD, *Pharmaceutical Residues in Freshwater: Hazards and Policy Responses*, 2019. https://www.oecd.org/en/publications/pharmaceutical-residues-in-freshwater_c936f42d-en.html
- [6] M. Veseli, M. Rožman, M. Vilenica, M. Petrović, y A. Previšić, «Bioaccumulation and bioamplification of pharmaceuticals and endocrine disruptors in aquatic insects», *Sci. Total Environ.*, vol. 838, p. 156208, sep. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156208.
- [7] C. Jiménez Cartagena, «Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos», *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 8, n.º 2, pp. 143-153, jul. 2011.
- [8] A. Peña-Álvarez y A. Castillo-Alanís, «Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM)», *TIP Rev. Espec. En Cienc. Quím.-Biológicas*, vol. 18, n.º 1, pp. 29-42, 2015.
- [9] F. García-Ávila, A. Zambrano-Jaramillo, C. Velecela-Garay, K. Coronel-Sánchez, y L. Valdiviezo-Gonzalez, «Effectiveness of membrane technologies in removing emerging contaminants from wastewater: Reverse Osmosis and Nanofiltration», *Water Cycle*, dic. 2024, doi: 10.1016/j.watcyc.2024.12.004.

- [10] J. Sharma, M. Joshi, A. Bhatnagar, A. K. Chaurasia, y S. Nigam, «Residuos farmacéuticos: uno de los problemas importantes para lograr 'agua limpia para todos' y su solución», *Environ. Res.*, vol. 215, p. 114219, dic. 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.114219.
- [11] J. A. Jaimes Urbina y J. A. Vera Solano, «Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización», *Inf. Téc.*, vol. 84, n.º 2 (Julio-Diciembre), pp. 249-263, 2020.
- [12] M. Á. López Ramírez *et al.*, "Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión", *Enfoque UTE*, vol. 12, n.º 4, pp. 76-87, dic. 2021, doi: 10.29019/enfoqueute.769.
- [13] VITAQUA "Aguas residuales hospitalarias: ¿Qué son y cómo tratarlas de manera segura?", Tratamiento y Depuración de Aguas. <https://vitaqua.es/aguas-residuales-hospitalarias-que-son-y-como-tratarlas-de-manera-segura/> Accedido: 19 de junio de 2026.
- [14] A. G. Estrada-Almeida, M. L. Castrejón-Godínez, P. Mussali-Galante, E. Tovar-Sánchez, and A. Rodríguez, "Pharmaceutical Pollutants: Ecotoxicological Impacts and the Use of Agro-Industrial Waste for Their Removal from Aquatic Environments," *J. Xenobiotics*, vol. 14, no. 4, pp. 1465–1518, Oct. 2024, doi: 10.3390/jox14040082..
- [15] M. Aftab, Z. U. Haq Khan, N. S. Shah, F. Ullah, and S. Khasim, "Advanced oxidation processes for pesticide degradation: a comprehensive review on the role of nano zero-valent metals and persulfate activation," *RSC Adv.*, vol. 15, no. 48, pp. 40619–40654, 2025, doi: 10.1039/d5ra06043e.
- [16] S. Bahrani, S. M. Mousavi, S. A. Hashemi, and M. Ghaedi, "Capítulo 7 - Procesos catalíticos heterogéneos actuales para la remediación ambiental del aire, el agua y el suelo," in *Photocatalysis: Fundamental Processes and Applications* (Interface Science and Technology, vol. 32), M. Ghaedi, Ed. Elsevier, 2021, pp. 443–498, doi: 10.1016/B978-0-12-818806-4.00008-5.
- [17] Biblioteca nacional de medicina, "Analgésicos", <https://medlineplus.gov/spanish/painrelievers.html>, Accedido: 19 de junio de 2026.
- [18] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 1256 de 2021: Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones," Nov. 23, 2021. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf> (accessed Nov. 7, 2025).
- [19] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Decreto 3930 de 2010: Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y

- residuos líquidos," Oct. 25, 2010. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40620> (accessed Feb. 5, 2026).
- [20] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público," Mar. 17, 2015. [Online]. Available: https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minambientes_0631_2015.htm (accessed Feb. 5, 2026).
- [21] Ministerio de la Protección Social, "Decreto 1575 de 2007: Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano," May 9, 2007. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007> (accessed Feb. 5, 2026).
- [22] M. K. Kardos, M. Patziger, Z. Jolánkai, and A. Clement, "The new urban wastewater treatment directive from the perspective of the receiving rivers' quality," *Environ. Sci. Eur.*, vol. 37, art. no. 10, 2025, doi: 10.1186/s12302-024-01040-2.
- [23] Organización Panamericana de la Salud, "Agua, Saneamiento e Higiene (WASH)," n.d. [Online]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento-e-higiene-wash> (accessed Feb. 5, 2026).
- [24] U.S. Environmental Protection Agency, "La lista de la EPA de productos desinfectantes aprobados contra el SARS-CoV-2 supera los 500," Oct. 21, 2020. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/newsreleases/la-lista-de-la-epa-de-productos-desinfectantes-aprobados-contra-el-sars-cov-2-supera> (accessed Feb. 5, 2026).
- [25] ONU Ambiente, "Unos 323 millones de personas enfrentan riesgos de salud por la creciente contaminación del agua en tres continentes," Aug. 30, 2016. [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/unos-323-millones-de-personas-enfrentan-riesgos-de-salud-por-la> (accessed Feb. 5, 2026).
- [26] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, "Resolución 268 de 2015: Requisitos y procedimiento de acreditación de organismos de evaluación de la conformidad," Mar. 6, 2015. [Online]. Available: <https://www.ideam.gov.co/transparencia/normativa/normativa-de-la-entidad-o-autoridad/resoluciones/resolucion-268-de-2015> (accessed Jun. 19, 2026).

- [27] R. M. L. Galera y S. P. García, "la espectrometría de masas. aplicaciones en el laboratorio clínico."
- [28] K. Mayolo-Deloisa, L. M. Martínez, and M. Rito-Palomares, "Técnicas cromatográficas y su aplicación a estudios de cambios conformacionales, estabilidad y replegamiento de proteínas," *Rev. Mex. Ing. Quím.*, vol. 11, no. 3, pp. 415–429, Dec. 2012.
- [29] R. M. L. Galera and S. P. García, "La espectrometría de masas en el laboratorio de microbiología clínica," *Enferm. Infecc. Microbiol. Clin.*, vol. 30, no. 10, pp. 601–608, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.eimc.2012.01.012.
- [30] C. H. Ortiz, "simplificación del tratamiento de muestra en el análisis de residuos de herbicidas en aguas mediante aplicación de las técnicas cromatográficas acopladas lc-lc y spe-lc", universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Peru, 2018.
- [31] E. Sierra-Gaviria *et al.*, «Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales contruidos en la remoción de mercurio de efluentes mineros auríferos», *Hidrobiológica*, vol. 34, n.º 1, pp. 51-59, abr. 2024, doi: 10.24275/gfnh6732.
- [32] Establecimientos de Salud CO, "Hospital Susana Lopez De Valencia - Popayán, Cauca 2026," n.d. [Online]. Available: <https://co.establecimientosdesalud.info/hospital-susana-lopez-de-valencia-48757/> (accessed Apr. 20, 2026).
- [33] D. F. A. Garay, L. C. Voltolini, R. G. Bastos, y C. F. Souza, "Effect of turbidity on ultraviolet disinfection of domestic wastewater for agricultural reuse", *Rev. Ambiente Água*, vol. 16, p. e2766, 2021, doi: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2766>.
- [34] R. Goswami, "Assessing Anthropogenic Stress on The Hugli Riverine Ecosystem During Monsoon: Associating Environmental Sustainability," *Int. J. Sci. Appl. Technol.*, vol. 16, no. 3, Aug. 24, 2025, doi: 10.71097/IJSAT.v16.i3.7895.
- [35] S. A. Ishmael, R. Opoku, M. K. Laryea, E. E. Kwaansa-Ansah, G. Darko, y L. S. Borquaye, «Occurrence and ecological risk assessment of commonly used pharmaceuticals in water and soil of Sefwi Wiawso, Ghana», *Discov. Chem.*, vol. 2, n.º 1, p. 97, abr. 2025, doi: 10.1007/s44371-025-00146-7.
- [36] P. A. León Cajamarca, "Calidad de agua de las pozas artificiales implementadas para recuperar la rana *Gastroeca* sp. en Cuenca y bioensayo toxicológico de sus larvas en medios acuáticos con diferentes concentraciones de nitrito de sodio," Master's thesis, Dept. Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2018. [Online]. Available: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/162b1bbe-1290-4885-8fd4-482ecc9288fa> (accessed Jun. 19, 2026).

- [37] P. K. Singh *et al.*, «Critical review on toxic contaminants in surface water ecosystem: sources, monitoring, and its impact on human health», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, n.º 45, pp. 56428-56462, sep. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-34932-0.
- [38] G. G. Anyi, «Evaluación de la eficiencia de la oxidación avanzada mediante fotocátalisis y ozonización en la reducción de la eco-toxicidad por AINEs en aguas residuales hospitalarias: una revisión sistemática de la literatura científica», ago. 2024, Accedido: 19 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14112/32322>
- [39] M. J. S. Senthil *et al.*, "Pharmaceutical pollution in the aquatic environment: advanced oxidation processes as efficient treatment approaches: a review," *Mater. Adv.*, vol. 6, no. 3, pp. 842–859, 2025, doi: 10.1039/D4MA01122H. [Online]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ma/d4ma01122h> (accessed Feb. 4, 2026).
- [40] A. T. Aquino Romero, "Influencia de los parámetros operacionales del proceso de absorción del CO₂ asistida por cavitación hidrodinámica sobre la reducción de la dureza cálcica en aguas subterráneas del distrito de Luyando - 2023", *Univ. Huánuco*, 2024, Accedido: 19 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/5084>
- [41] H. Maoied, «LG Sonic», LG Sonic. Accedido: 19 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.lgsonic.com/es/impacto-de-las-fluctuaciones-del-nivel-del-agua/>
- [42] D. F. Acosta Botina, «Diseño de una estrategia para el tratamiento de aguas de retorno de yacimientos no convencionales para su aplicabilidad en Colombia según la resolución 0631 del 2015 y la normas ASTM 1193 del 2011», feb. 2022, Accedido: 19 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9063>
- [43] M. Petrovic, M. Gros, y D. Barcelo, «Multi-residue analysis of pharmaceuticals in wastewater by ultra-performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight mass spectrometry», *J. Chromatogr. A*, vol. 1124, n.º 1-2, pp. 68-81, ago. 2006, doi: 10.1016/j.chroma.2006.05.024.
- [44] A. B. A. Boxall *et al.*, "Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives," *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 35, no. 4, pp. 823–836, Apr. 2016. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/etc/article-abstract/35/4/823/7742012> (accessed Apr. 21, 2026).
- [45] V. Stankov *et al.*, «Environmental aspects of UV-C-based processes for the treatment of oxytetracycline in water», *Environ. Pollut.*, vol. 277, p. 116797, may 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116797.

- [46] Y. Guo, C. Liu, R. Ye, and Q. Duan, "Advances on Water Quality Detection by UV-Vis Spectroscopy," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 19, Art. no. 6874, Sep. 2020, doi: 10.3390/app10196874. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6874> (accessed Apr. 21, 2026).
- [47] J. Zhu, D. D. Snow, D. A. Cassada, S. J. Monson, y R. F. Spalding, "Analysis of oxytetracycline, tetracycline, and chlortetracycline in water using solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry", *J. Chromatogr. A*, vol. 928, n.º 2, pp. 177-186, sep. 2001, doi: 10.1016/s0021-9673(01)01139-6.
- [48] J. L. S. Duarte, A. Hayat, M. de la Fuente, C. M. Domínguez, A. Santos, y S. Cotillas, "Removal of meropenem from hospital wastewater using biochar derived from grape stalks", *J. Environ. Manage.*, vol. 393, p. 127004, oct. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.127004.
- [49] A. Kumar *et al.*, "Unveiling the potential of machine learning in cost-effective degradation of pharmaceutically active compounds: A stirred photo-reactor study," *Chemosphere*, vol. 358, Art. no. 142222, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142222.
- [50] R. L. Acevedo Barrios, C. A. Severiche Sierra, y J. D. C. Jaimes Morales, "Bacterias resistentes a antibióticos en ecosistemas acuáticos", *Prod. Limpia*, vol. 10, n.º 2, pp. 160-172, jul. 2015.
- [51] J. Li, C. Li, N. de O. dos Santos, L. A. Teixeira, y L. C. Campos, "Removal of diethyltoluamide, paracetamol, caffeine and triclosan from natural water by photo-Fenton process using powdered zero-valent iron", *J. Water Process Eng.*, vol. 48, ago. 2022, Accedido: 23 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102907>
- [52] O. M. González Díaz, M. Navarro, B. Bayarri, J. Giménez, y S. Esplugas Vidal, "Eliminación de contaminantes en aguas residuales mediante procesos fotocatalíticos de oxidación avanzada", *Afinidad Rev. Quím. Teórica Apl. ISSN 0001-9704 V 64 528 P 171-176*, 2007, Accedido: 23 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://accedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/57062>
- [53] B. Sellam, N. Seraghni, C. Bouaziz, S. Belaidi, N. Debbache, y T. Sehili, "Degradación mejorada del herbicida metobromurón mediante procesos tipo Fenton ($\text{Fe}^{3+}/\text{CaO}_2$) y foto-Fenton ($\text{Fe}^{3+}/\text{CaO}_2/\text{UV A}$) basados en peróxido de calcio.", *J. Water Process Eng.*, vol. 71, p. 107307, mar. 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107307.
- [54] B. Ramos, L. B. Ferreira, P. H. Palharim, P. Metolina, C. de A. Gusmão, y A. C. S. C. Teixeira, "A continuous photo-Fenton-like process using persulfate salts for the

- degradation of acetaminophen under solar irradiation at circumneutral pH", *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 14, p. 100473, may 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.100473.
- [55] S. Babaei, F. Rokhbakhsh-Zamin, M. Ahmadian, D. Kalantar-Neyestanaki, y N. Kazemipour, "Photo-Fenton like catalyst system with CuCOFe₂O₄@AC nanoparticles for ciprofloxacin removal from aqueous solutions and effluent toxicity assessment by *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* bacteria", *Appl. Water Sci.*, vol. 14, n.º 9, p. 199, ago. 2024, doi: 10.1007/s13201-024-02262-8.
- [56] C.A. Rios Gonzales, "Foto degradación de compuestos contaminantes presentes en aguas residuales por nano materiales de SiO₂/TiO₂/GO". [Tesis de maestría] Universidad Nacional Autónoma de México, "RUDGB: Repositorio Único de la Dirección General de Bibliotecas," [En línea]. Available: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3562419> accessed: Apr. 23, 2026
- [57] W. Bou Karroum, A. Baalbaki, A. Nasreddine, N. Oueidat, y A. Ghauch, «From batch system toward continuous UV/PS based AOP reactor: the case of tramadol effluent degradation††Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: <https://doi.org/10.1039/d4va00103f>», *Environ. Sci. Adv.*, vol. 3, n.º 9, pp. 1244-1258, ago. 2024, doi: 10.1039/d4va00103f.
- [58] V. Garzón-Cucaita y J. G. Carriazo, «Óxidos de hierro como catalizadores de procesos tipo Fenton con potencial aplicación en tecnologías de remoción de contaminantes», *TecnoLógicas*, vol. 25, n.º 55, 2022, Accedido: 19 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3442/344272383014/html/>
- [59] H. Farzaneh, K. Loganathan, J. Saththasivam, G. McKay, "Ozone and ozone/hydrogen peroxide treatment to remove gemfibrozil and ibuprofen from treated sewage effluent: Factors influencing bromate formation" *Science Direct*, Vol 6, 2020, Pages 225-234, 21 Junio 2020, <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2020.06.002>
- [60] V. Escobar Tovar, K. D. Fernández Vargas, A. Arias Hoyos, E. F. Sierra Gaviria y C. Fernández Morantes, "Tratamiento Foto-Fenton para la remoción de dipirona en agua residual hospitalaria de San Antonio de Padua, La Plata - Huila," in *De la investigación formativa a la investigación formal. Investigación para el desarrollo sostenible*, Popayán, Colombia: Sello Editorial Uniautónoma del Cauca, Dec. 2023, pp. 109–130. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/389033768_Tratamiento_Foto_Fenton_para_la_remocion_de_dipirona_en_agua_residual_hospitalaria_de_San_Antonio_de_Padua_La_Plata_-_Huila (accessed Apr. 16, 2026).

- [61] R. Andreozzi, V. Caprio, A. Insola, y R. Marotta, "Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery", *Catal. Today*, vol. 53, n.º 1, pp. 51-59, oct. 1999, doi: 10.1016/S0920-5861(99)00102-9.
- [62] G. Mai *et al.*, "Control de estabilidad y construcción en proyectos de reconstrucción de cubiertas de armadura de acero existentes: análisis de casos y simulación numérica," *Buildings*, vol. 15, no. 12, Art. n.º 2059, Dic. 2025, doi: 10.3390/buildings15122059. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/12/2059> (accedido el 23 de febrero de 2026).
- [63] Y. L. Zhou, Z. H. Lu, y X. M. Wang, "Integrating enhanced optimization with finite element analysis for designing steel structure weight under multiple constraints," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 30, n.º 3, pp. 245–258, 2024, doi: 10.3846/jcem.2024.20399. [En línea]. Disponible en: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/JCEM/article/view/20399> (accedido el 23 de febrero de 2026).
- [64] T. Savage, N. Basha, J. McDonough, O. K. Matar, y E. A. del R. Chanona, «Multi-Fidelity Data-Driven Design and Analysis of Reactor and Tube Simulations», 7 de julio de 2023, *arXiv*: arXiv:2305.00710. doi: 10.48550/arXiv.2305.00710.
- [65] J. J. Pignatello, E. Oliveros, y A. A. MacKay, "Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 36, n.º 1, pp. 1–84, 2006, doi: 10.1080/10643380500326564. [En línea]. Disponible en: <https://colab.ws/articles/10.1080%2F10643380500326564> (accedido el 23 de febrero de 2026).
- [66] M. Coey *et al.*, Eds., *Advanced Hard and Soft Magnetic Materials*, vol. 577. Cambridge, Reino Unido: Cambridge Univ. Press, 1999.
- [67] G. Brundu *et al.*, "Impact of invasive alien plants on native plant communities and Natura 2000 habitats: State of the art, gap analysis and perspectives in Italy," *J. Environ. Manage.*, vol. 274, Art. n.º 111140, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111140.
- [68] K. Stefaniak, M. Harnisz, M. Mecik, y E. Korzeniewska, «ARB inactivation, ARGs and antibiotics degradation in hospital wastewater», 4 de junio de 2025, *arXiv*: arXiv:2506.03630. doi: 10.48550/arXiv.2506.03630.
- [69] K. Sandeep y C. S. Matli, "Advanced Oxidation Treatment of Emerging Pollutants from Pharmaceutical Industrial Wastewaters – A Review," *Ozone: Sci. Eng.*, vol. 46, n.º 6, pp. 526–546, 2024, doi: 10.1080/01919512.2024.2317287. [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01919512.2024.2317287> (accedido el 23 de febrero de 2026).

- [70] C. Gong *et al.*, «Conocimientos sobre la degradación del contaminante farmacéutico atenolol mediante procesos de oxidación electroquímica avanzada con electrodos de Ti 4 O 7 modificados : eficiencia, estabilidad y mecanismo», *Environ. Res.*, vol. 228, p. 115920, jul. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.115920.
- [71] F. Sánchez-Martos, J. M. López-Martos, L. Molina Sánchez, J. Gisbert-Gallego, y F. Navarro-Martínez, "Influence of Groundwater Discharge on Temporal Evolution in Two Wetlands of an Intensely Anthropized Area: Analysis Using an Integrated Approach", *Water*, vol. 13, n.º 5, p. 697, ene. 2021, doi: 10.3390/w13050697.
- [72] V. Homem y L. Santos, "Degradation and removal methods of antibiotics from aqueous matrices – A review", *J. Environ. Manage.*, vol. 92, n.º 10, pp. 2304-2347, oct. 2011, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.05.023.
- [73] M. Pera-Titus, V. García-Molina, M. A. Baños, J. Giménez, y S. Esplugas, "Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 47, n.º 4, pp. 219–256, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.apcatb.2003.09.010.

Anexos

Anexo 1. Equipo de trabajo durante la actividad de muestreo en campo, responsable de la recolección y manejo de muestras para su posterior análisis en laboratorio.



Anexo 2. Toma de muestras de agua residual en campo, mediante recolección directa en punto de descarga, para su posterior análisis fisicoquímico.



Anexo 3. Preparación de soluciones en laboratorio utilizando material volumétrico para el desarrollo del análisis experimental.



Anexo 4. Ficha técnica de TML

Producto	Tramadol 50mg
Principio activo	Tramadol
Titular	Laboratorio
Registro sanitario	INVIMA 2025M-0013188-R1
Modalidad	Uso institucional
Formula	Solución inyectable
Vía	Intramuscular
ATC	N02AX02
Grupo terapéutico principal	Analgésico opioide

Anexo 5. Ampolleta de TML utilizada durante los ensayos de remoción en prototipo.



Anexo 6. Ficha técnica de ACETA

Producto	Acetaminofén 1g
Principio activo	Acetaminofén
Titular	LABORATORIO CORPAUL FARMACEUTICA
Registro sanitario	INVIMA 2023M-0012054-R2
Modalidad	Uso institucional
Formula	Solución inyectable 100ml
Vía	Intramuscular
ATC	N02BE01
Grupo terapéutico principal	Analgésico no opioide

Anexo 7. Figura del ACETA utilizado durante los ensayos de remoción en prototipo.