

Revisión sistemática de los contaminantes farmacológicos emergentes presentes en recursos hídricos, métodos de cuantificación y tratamientos para su eliminación en Colombia

Cristian Uribe Luna y Karol Nathalia Toloza Ariza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico
Modalidad trabajo de investigación

Director

Cesar Augusto Guevara Lastre

Ingeniero Químico
Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios, porque en medio de la adversidad siempre me mostró que era posible llegar a tierra firme.

A toda mi familia Uribe Luna, que, con su amor incondicional, esfuerzo y apoyo logré alcanzar un sueño que en algún momento vi lejano y hoy es una realidad. Ustedes son parte de mis metas y de mi felicidad.

A mis ángeles, que en vida anhelaron que llegara este momento. Hoy les dedico con profundo e infinito amor este triunfo; aunque no estén físicamente conmigo, sé que desde el cielo también lo celebran.

A mis amigos y a quienes me acompañaron a lo largo de este camino e hicieron parte de esta historia y hoy no están conmigo, siempre los llevo en mi corazón.

A mi compañera de tesis, Karol Nathalia Toloza Ariza, gracias por la dedicación, esfuerzo y el gran trabajo en equipo, que hoy se ve reflejado en este proyecto de grado.

Cristian Uribe Luna

Tabla de contenido

Introducción	8
1. Objetivos	10
1.1 Objetivo general	10
1.2 Objetivos específicos	10
2. Estado del arte	11
3. Metodología	13
3.1 Fase I: Búsqueda de información en bases de datos para su revisión y filtrado	14
3.2 Fase II: Revisión de información y estrategia de organización	16
3.3 Fase III: Análisis bibliométrico y síntesis de resultados	16
4. Análisis y discusión de resultados	17
4.1 Selección de información: resultados del protocolo PRISMA	17
4.2 Análisis bibliométrico	20
4.3 Contaminantes Emergentes de origen farmacéutico en Colombia	24
4.3.1 Clasificación de los fármacos reportados en Colombia según su uso terapéutico	28
4.3.2 Distribución de los puntos de muestreo y priorización de fármacos	32
4.4 Métodos de cuantificación y tecnologías de eliminación para contaminantes emergentes de origen farmacéutico.	34
4.4.1 Métodos de cuantificación	37
4.4.2 Tecnologías de eliminación	40
4.5 Sistema propuesto para la remoción de CEs farmacológicos en Colombia	50
4.5.3 Desafíos y análisis TRL	56
5. Conclusiones	60
6. Recomendaciones	62
Referencias	63

Lista de Tablas

Tabla 1. Criterios de selección empleados en la revisión sistemática	15
Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda y resultados en cada base de datos.....	17
Tabla 3. Artículos con más citasiones	22
Tabla 4. Reporte de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en Colombia	26
Tabla 5. Reporte de métodos de cuantificación y tecnologías de eliminación para contaminantes emergentes de origen farmacéutico.	35
Tabla 6. Reporte de tratamientos para la eliminación de CEs de origen farmacéutico.	41
Tabla 7. Reporte de la eficiencia de eliminación de tratamientos avanzados para la degradación de CEs de origen farmacéutico.	45
Tabla 8. Niveles TRL de diferentes tratamientos para la remoción de CEs de origen farmacéutico	57

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama metodológico	13
Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA 2020	19
Figura 3. Distribución de artículos por año	21
Figura 4. Distribución de bases de datos consultadas.....	21
Figura 5. Mapa de la relación de palabras claves en VosViewer	24
Figura 6. Clasificación y ocurrencia de los fármacos detectados según su uso terapéutico.....	29
Figura 7. Distribución de los puntos de muestreo y lista de priorización de fármacos.	33
Figura 8. Métodos de detección y cuantificación.	38
Figura 9. Tratamientos de adsorción y capacidades máximas de adsorción	47
Figura 10. Eficiencias de eliminación por diferentes tratamientos avanzados	48
Figura 11. Esquema de un sistema de tratamiento de aguas residuales con foto-Fenton	53
Figura 12. Mapa de la irradiación solar en Colombia.....	55

Resumen

Título: Revisión sistemática de los contaminantes farmacológicos emergentes presentes en recursos hídricos, métodos de cuantificación y tratamientos para su eliminación en Colombia *

Autores: Uribe Luna Cristian, Toloza Ariza Karol Nathalia **

Palabras clave: Contaminantes farmacéuticos emergentes, agua residual, eliminación, tratamientos, fármacos, Colombia.

Descripción: El estudio de los contaminantes emergentes de origen farmacéutico ha generado gran interés en la comunidad científica por la amenaza creciente que representan estos compuestos en el ecosistema acuático y la calidad del agua. Los sistemas de tratamientos de aguas residuales no logran depurar por completo estos contaminantes, generando acumulación y persistencia causada por las propiedades recalcitrantes de estos fármacos, en particular los antibióticos. Su presencia se debe principalmente por actividad antropogénica, especialmente al consumo masivo y no regulado de fármacos.

Para este estudio, se llevó cabo una revisión sistemática de la literatura utilizando la metodología PRISMA, con el objetivo de identificar los contaminantes emergentes de origen farmacéuticos presentes en diferentes matrices acuáticas en Colombia, así mismo, se analizaron los métodos de cuantificación y eliminación con el fin de proponer un sistema de depuración de aguas residuales basado en las tecnologías más investigadas en los artículos revisados en las bases de datos consultadas, incluyendo *ScienceDirect*, *Scopus*, *Springer*, *SciELO* y la Red Colombiana de Información Científica del Ministerio de Ciencias (Minciencias). En total, se seleccionaron 43 artículos relevantes publicados entre el 2014 y 2025, que reportaron los fármacos con mayor presencia en matrices acuáticas colombianas, como la carbamazepina, diclofenaco y el ibuprofeno. Estos fármacos fueron detectados y cuantificados mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) y Cromatografía Líquida acoplada a Espectrometría de Masas (UPLC-MS/MS). La oxidación avanzada por foto-Fenton se destacó por su efectividad en la eliminación de contaminantes de origen farmacéutico. Para el contexto colombiano, se propone su aplicación acoplada a un sistema biológico, aprovechando la disponibilidad de radiación solar que permite optimizar el proceso y reducir costos energéticos. Aunque representa una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales, se requieren estudios más detallados para su aplicación a escala real en una PTAR.

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Cesar Augusto Guevara Lastre. Ingeniero Químico, Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales.

Abstract

Title: Systematic review of emerging pharmacological pollutants presents in water resources, quantification methods and treatments for their elimination in Colombia. *

Authors: Uribe Luna Cristian, Toloza Ariza Karol Nathalia **

Key Words: Emerging pharmaceutical contaminants, wastewater, elimination, treatments, drugs, Colombia.

Description: The study of emerging contaminants of pharmaceutical origin has generated significant interest within the scientific community due to the growing threat that these compounds represent to the aquatic ecosystem and water quality. Wastewater treatment systems are unable to completely remove these pollutants, generating accumulation and persistence caused by the recalcitrant properties of these drugs, particularly antibiotics. Their presence is mainly due to anthropogenic activity, especially the widespread and unregulated consumption of drugs.

For this study, a systematic review of the literature was carried out using the PRISMA methodology, with the objective of identifying emerging pharmaceutical contaminants present in different aquatic matrices in Colombia, as well as analyzing methods for their quantification and removal in order to propose a wastewater treatment system based on the most researched technologies in the reviewed literature in the databases consulted, including *ScienceDirect*, *Scopus*, *Springer*, *SciELO* and the Colombian Network of Scientific Information of the Ministry of Science (Minciencias). In total, 43 relevant articles published between 2014 and 2025 were selected, which reported the pharmaceuticals most frequently found in Colombian aquatic matrices, such as carbamazepine, diclofenac, and ibuprofen. These drugs were detected and quantified using High- Performance Liquid Chromatography (HPLC) and Liquid Chromatography coupled to Mass Spectrometry (UPLC-MS/MS). Advanced oxidation using photo-Fenton has proven effective for its effectiveness in the elimination of contaminants of pharmaceutical origin. For the Colombian context, its application in combination with a biological system is proposed, taking advantage of high availability of solar radiation to optimize the process and reducing energy costs. Although it represents a sustainable alternative for wastewater treatment, more detailed studies are required for its application on a full scale in WWTP.

* Bachelor's Thesis

** Industrial University of Santander. Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Cesar Augusto Guevara Lastre. Chemical Engineer, M.S in Environmental Science and Technology.

Introducción

El agua es el recurso natural que está asociado a la vida. Su disponibilidad en cuanto a cantidad y calidad establece los niveles de bienestar humano y el desarrollo económico de los países del mundo (Dávila et al., 2017) siendo una fuente indispensable en diferentes actividades como la agricultura, la industria y la producción de energía. Si bien, la industrialización ha impulsado al crecimiento económico y social, también ha generado un aumento en los índices de contaminación y vertimientos de residuos al medio ambiente (Jaimes Arias, 2020).

El desconocimiento sobre el destino de los productos que a diario consumimos ha permitido que los ecosistemas, en particular los acuáticos, se contaminen con compuestos o metabolitos que antes pasaban inadvertidos por su origen y naturaleza química distinta. En general, estas sustancias químicas son denominadas Contaminantes Emergentes (CEs) (Carrillo, 2016). Por sus bajas concentraciones, los CEs no son eliminados eficazmente con los tratamientos de agua convencionales. Estos pueden ser acumulados y causar un gran impacto en la salud y el medioambiente, provocando alteraciones en disruptores endocrinos, problemas hormonales, y contribuir a la resistencia antimicrobiana (Gil et al., 2012).

El grupo de CEs incluyen una amplia variedad de compuestos, como por ejemplo, los pesticidas, los fármacos (analgésicos, antidepresivos y antibióticos), productos del cuidado personal, hormonas, nicotina, e incluso las drogas ilícitas, entre otros (Buitrago-González et al., 2024). Dentro del grupo, los compuestos de origen farmacéutico son los más frecuentemente detectados, en particular los antibióticos, son los que generan gran preocupación y estudio debido a su resistencia antimicrobiana.

Según las propiedades fisicoquímicas de los fármacos, sus metabolitos, productos de degradación, y las características de los suelos, estas sustancias pueden llegar a alcanzar las aguas

subterráneas y contaminar los acuíferos o bien quedar retenidas en el suelo y acumularse pudiendo afectar al ecosistema y a los humanos a través de la cadena trófica (Tejada, 2014).

Su reciente detección o frecuencia creciente de aparición se debe, en gran parte, al desarrollo de nuevos y más sensibles métodos de cuantificación, que permiten llegar a límites de detección y concentraciones en trazas de ($\mu\text{g/L}$ o ng/L), y no se debe tanto a que haya nuevas fuentes de contaminación o vertidos en el medio ambiente. (González Canal et al., 2018).

Con los problemas desarrollados en la actualidad referente a los contaminantes emergentes y riesgos identificados en la salud pública y el medio ambiente, se hace necesario que en Colombia se realice un monitoreo o seguimiento para identificar los contaminantes emergentes de origen farmacéutico que llegan a las fuentes hídricas (Botero-Coy et al., 2018), que por su grado de concentración las plantas de tratamiento no logran eliminar en su totalidad. (Fabregat-Safont et al., 2023)

Por lo tanto, en este trabajo se pretende contribuir al conocimiento de contaminantes emergentes de origen farmacológico, de uso exclusivo en seres humanos, mediante una revisión sistemática de la literatura. Se recopilaron los estudios publicados sobre Colombia para identificar los fármacos encontrados en mayor proporción en los efluentes de aguas residuales o en recursos hídricos colombianos, con el objetivo de dar a conocer instrumentos y tecnologías para su detección y eliminación en los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). En ese contexto, se han planteado las siguientes dos preguntas problema. ¿Cuáles son los fármacos con mayor presencia en los recursos hídricos colombianos? y ¿Cómo los métodos de detección y eliminación contribuyen al adecuado manejo de estos contaminantes químicos?

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Identificar los contaminantes farmacológicos emergentes presentes en recursos hídricos, los métodos de cuantificación y tratamientos para su eliminación en Colombia, mediante una revisión sistemática de la literatura.

1.2 Objetivos específicos

Encontrar información científica mediante una revisión sistemática de los principales contaminantes emergentes que han sido reportados en los cuerpos de agua por el uso de medicamentos en Colombia.

Comparar los métodos de cuantificación y tecnologías de eliminación más usadas para la identificación y degradación de estos compuestos emergentes.

Proponer un sistema de eliminación o depuración con base en los resultados de la revisión bibliográfica para los contaminantes emergentes con mayor presencia en Colombia en las aguas residuales.

2. Estado del arte

En la Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA), en 2021, la publicación de J.A Flórez tuvo como propósito evaluar la presencia de naproxeno, ibuprofeno, gemfibrozilo, cafeína y triclosán en muestras de agua superficial tomadas en el río Sinú, ubicado en Colombia; en muestras de agua de consumo humano en la ciudad de Montería y en agua residual colectada en los diferentes canales de descargas de agua doméstica de la misma ciudad. Dicho estudio recurrió a la técnica de Cromatografía Líquida de Ultra Alta Presión (UHPLC) para la detección y cuantificación. Los hallazgos permitieron evidenciar una mayor frecuencia de detección del ibuprofeno, seguido del naproxeno, gemfibrozilo, cafeína y triclosán. Así mismo, detectaron ibuprofeno y gemfibrozilo en agua de consumo humano que reveló la baja eficacia del proceso de potabilización empleado. Son necesarios más estudios en el área para comprender y evidenciar el impacto ambiental de los CEs (Flórez et al., 2021).

El estudio titulado "Antibióticos de alto consumo en Colombia, excreción en orina y presencia en aguas residuales - una revisión bibliográfica" realizada por Efraím A. & Ricardo A. (Serna-Galvis, Martínez-Mena, et al., 2022a) se centra en la revisión del consumo de antibióticos en Colombia, su excreción y presencia en aguas residuales. El trabajo compila datos de informes de la Organización Mundial de la Salud, artículos de investigación y bases de datos para identificar los antibióticos de mayor consumo en el país, y la concentración en efluentes de las PTAR, entre ellos amoxicilina, ciprofloxacina (2.29 µg/L) y azitromicina (5.84 µg/L).

La metodología utilizada incluye la búsqueda bibliográfica en bases de datos como *SCOPUS*, *SCIELO* y *Google Scholar* para obtener información sobre el consumo y la excreción de antibióticos. Los antibióticos de mayor consumo son excretados en orina en proporciones significativas, con cifras superiores al 30 % para la mayoría de ellos. Además, se observó una alta

presencia de estos fármacos en aguas residuales y ambientales, destacándose la ciprofloxacina y la azitromicina (Serna-Galvis, Martínez-Mena, et al., 2022a). El estudio subraya la insuficiencia de los sistemas de tratamiento convencionales para eliminar estos compuestos, contribuyendo a la persistencia en el medio ambiente. Las deficiencias incluyen la falta de información detallada sobre los efectos ambientales específicos de estos contaminantes y la necesidad de estudios más profundos sobre el impacto real. El trabajo complementa la literatura existente al proporcionar un panorama general sobre el consumo y la gestión de antibióticos en Colombia, y aunque no presenta contradicciones significativas con otros estudios, destaca la necesidad de investigación adicional para abordar las limitaciones y mejorar la eliminación de estos CE (Serna-Galvis, Martínez-Mena, et al., 2022a).

Finalmente, Agudelo (2019) llevó a cabo un estudio centrado en el desarrollo de una tecnología de bajo costo para tratar y degradar contaminantes emergentes en aguas residuales, incluyendo antibióticos, disruptores endocrinos y productos de cuidado personal. La investigación se basó en una revisión de tecnologías efectivas a nivel internacional, destacando los procesos de oxidación avanzada como prometedores. Se diseñó y probó un sistema de tratamiento combinando estos procesos con vermifiltración, y se desarrolló un modelo cinético para simular la degradación del antibiótico Meropenem. Los resultados mostraron que esta combinación fue eficaz para tratar CE, mejorando la remoción de materia orgánica e inorgánica y la eliminación del Meropenem. Sin embargo, el estudio señaló la necesidad de más validación con distintos tipos de aguas, ajuste del modelo de pH y un análisis detallado de durabilidad, costos y escalamiento del sistema. Se recomendó escalar el sistema a nivel piloto para evaluar su efectividad en condiciones operativas y explorar diferentes configuraciones y parámetros para optimizar su rendimiento. Se recomienda comparar con estudios de otras regiones para una visión más amplia (Agudelo, 2019).

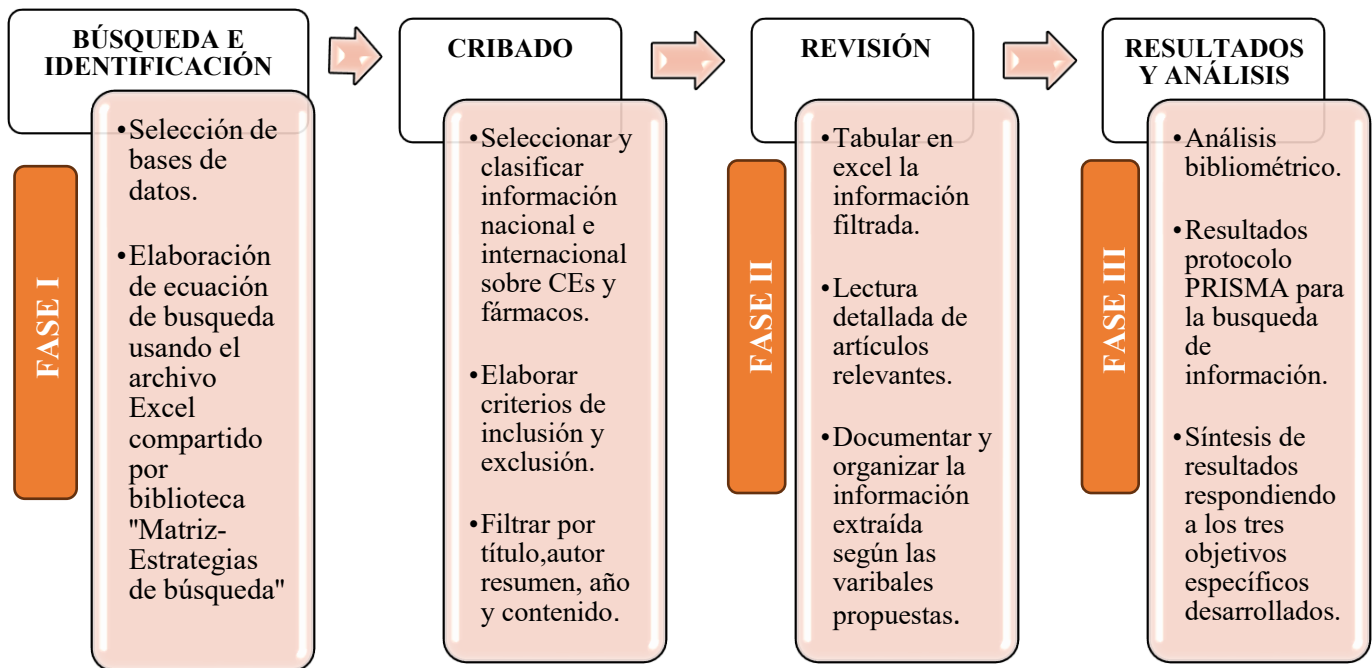
3. Metodología

El modelo metodológico desarrollado para la revisión sistemática se fundamentó en los “Elementos Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis” método más conocido como PRISMA, basados en los lineamientos y estrategias propuestas por (Sánchez Serrano et al., 2022) y (Blanco Gómez et al., 2021).

Para dar respuesta a los objetivos del tema de interés, se planteó la estrategia metodológica dividida en tres fases, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Diagrama metodológico



Con el fin de disminuir el sesgo de la investigación y errores en la selección de información se ha tomado como guía el documento de declaración PRISMA 2020, que consta de una lista de verificación de 27 elementos (Page et al., 2021) agrupados en 7 secciones o temas, que sirvió como recomendación para documentar el procedimiento de manera simultánea al desarrollo de la

investigación (ver Apéndice A), así como un diagrama de flujo en el que se muestran los criterios utilizados en la revisión sistemática, indicando documentos seleccionados, revisados y descartados de las diferentes bases de datos consultadas (Sánchez Serrano et al., 2022).

3.1 Fase I: Búsqueda de información en bases de datos para su revisión y filtrado

Se seleccionaron los motores de búsqueda de información científica proporcionada en las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander, tales como: *Science Direct*, *Scopus* y *Springer*; bibliotecas electrónicas de acceso libre como *Scielo* y la base de datos de la red colombiana de información científica del Ministerio de Ciencias (Minciencias) para la producción científica sobre CE en Colombia.

Con el fin de definir el dominio de la investigación, se utilizaron ecuaciones de búsqueda (expresiones que consisten en palabras claves y operadores lógicos) que incluyen términos específicos del tema investigado (Gómez-Luna et al., 2014). Estas ecuaciones de búsqueda se formularon con ayuda de la matriz Excel proporcionada por la biblioteca de la UIS.

Se usaron palabras claves en inglés, esto con la finalidad de abarcar un mayor rango de información dentro de los buscadores, algunas de estas palabras claves fueron “*Emerging pharmaceutical contaminants*”, “*removal*”, “*methods*”, “*wastewater*”, “*presence*” y “*Colombia*”, estas palabras fueron separadas por operadores booleanos de tipo “OR” y “AND”, lo que permitió formar las distintas ecuaciones de búsqueda.

En la segunda parte de la fase I, denominada cribado, se establecieron criterios de inclusión y exclusión que facilitaron el filtrado de la información y documentos. Dichos criterios de elección se muestran en la Tabla 1, estos se ajustaron teniendo en cuenta las dos preguntas de investigación planteadas así ¿Cuáles son los fármacos con mayor presencia en los recursos hídricos colombianos? y ¿Cómo los métodos de detección y eliminación contribuyen al adecuado manejo

de estos contaminantes químicos?

Tabla 1.

Criterios de selección empleados en la revisión sistemática

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Investigaciones donde se mencionen los contaminantes emergentes de origen farmacéutico encontrados en fuentes hídricas y aguas residuales colombianas.	Investigaciones donde se mencionen fármacos cuyo uso no estén relacionados con la medicina humana.
Artículos relacionados con los métodos de detección y eliminación de contaminantes emergentes, exclusivamente de fármacos de uso humano.	Artículos cuyo contenido mencionen contaminantes emergentes que provengan de fuentes diferentes a la farmacéutica y el área de estudio sea fuera de Colombia.
Artículos publicados incluyendo el año 2014 hasta el 2025, en los idiomas inglés y español.	Tipo de documentos: Manuscritos de congresos, conferencias o capítulos de libros, <i>Reviews</i> de artículos, <i>web logs</i> , catálogos de productos y servicios de empresas, dosieres, carteles, encuestas y otros documentos fuera de los libros y las revistas seriadas.

Con las ecuaciones de búsqueda establecidas y teniendo en cuenta los criterios de inclusión de la Tabla 1, se descargaron los archivos seleccionados en formato tipo “.RIS ” desde cada una de las bases de datos. Estos archivos contenían información de las citas bibliográficas donde se incluía el título, los autores, la fecha de publicación, el resumen, las palabras claves y las referencias de los artículos.

Como primer cribado, utilizando los filtros de las bases de datos, se excluyeron documentos según el tipo de artículo y año de publicación. Los documentos resultantes se cargaron en el software de acceso libre *Zotero* con el fin de descartar duplicados. Posteriormente, los archivos con las referencias se exportaron al Software *Rayyan*, una herramienta web que facilitó el proceso de gestión y filtrado de documentos en la revisión sistemática por medio de una lectura rápida de títulos y resúmenes de los artículos. Para la segunda etapa de filtrado, con ayuda del software

Rayyan, se decidió descartar de dos maneras los documentos que no cumplían los objetivos de la revisión. Primero, filtro por título, aquellos documentos que no mencionaban el tema a investigar, no contenían palabras claves de la ecuación de búsqueda o no cumplían con los criterios de selección. Por otro lado, el filtro por resumen, se seleccionaron aquellos que planteaban una metodología y resultados relacionados a los CE en recursos hídricos o aguas residuales en Colombia de origen farmacéutico, así como las tecnologías de identificación y cuantificación de estos compuestos emergentes.

3.2 Fase II: Revisión de información y estrategia de organización

Finalizando la localización de fuentes y recursos de información del objeto de estudio, se aplicó la metodología PRISMA para clasificar, extraer y seleccionar documentos determinantes en función de los criterios de selección y de las preguntas de investigación planteadas. Estos documentos se tabularon en una matriz Excel que incluyeron elementos claves como: título, autores, año de publicación, resúmenes con los principales hallazgos, conclusiones, palabras claves. El objetivo fue sintetizar la información recopilada y organizar los documentos enfocados en el ámbito farmacéutico colombiano, así como los métodos de detección y eliminación de los compuestos farmacológicos emergentes, facilitando así una lectura detallada y la extracción de hallazgos de los diferentes autores.

3.3 Fase III: Análisis bibliométrico y síntesis de resultados

En esta última fase se llevó a cabo un análisis bibliométrico con la información organizada y tabulada en las fases anteriores para dar a conocer los resultados obtenidos y responder a los objetivos establecidos. Se utilizó la plataforma *VosViewer*, la cual facilitó la elaboración de un mapa bibliométrico con palabras claves usadas en la investigación.

Después de la revisión de los documentos, se analizaron las tecnologías propuestas por los autores seleccionados para la identificación y depuración de estos compuestos emergentes. Esta información permitió seleccionar la tecnología más adecuada en función del contaminante farmacéutico comúnmente encontrado en Colombia, con el objetivo de proponer su aplicación en una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR).

4. Análisis y discusión de resultados

4.1 Selección de información: resultados del protocolo PRISMA

En total se emplearon diez ecuaciones de búsqueda, teniendo en cuenta las palabras claves y operadores booleanos definidos en la Sección 3.1, primera fase de la metodología. Estas ecuaciones fueron usadas como búsqueda avanzada en las bases de datos de *Scopus*, *Science Direct*, *Scielo*, *Springer* y la *Red Colombiana de Información Científica*. Creando dos ecuaciones de búsqueda para cada base de datos. El objetivo fue encontrar, con una de esas ecuaciones, referencias que documentaran información específica sobre la presencia de CEs de origen farmacéutico únicamente en Colombia. La cantidad de resultados obtenidos en cada uno de los motores de búsqueda se evidencian en la Tabla 2.

Tabla 2.

Ecuaciones de búsqueda y resultados en cada base de datos.

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
<i>Science Direct</i>	('Emerging pharmacological contaminants' OR 'Emerging pharmaceuticals contaminants') AND (Colombia) AND ('Wastewater' OR 'Sewage water') AND ('Water bodies')	576
	("Emerging contaminants") AND ("Pharmaceuticals") AND ("removal") AND ("treatment") AND	175

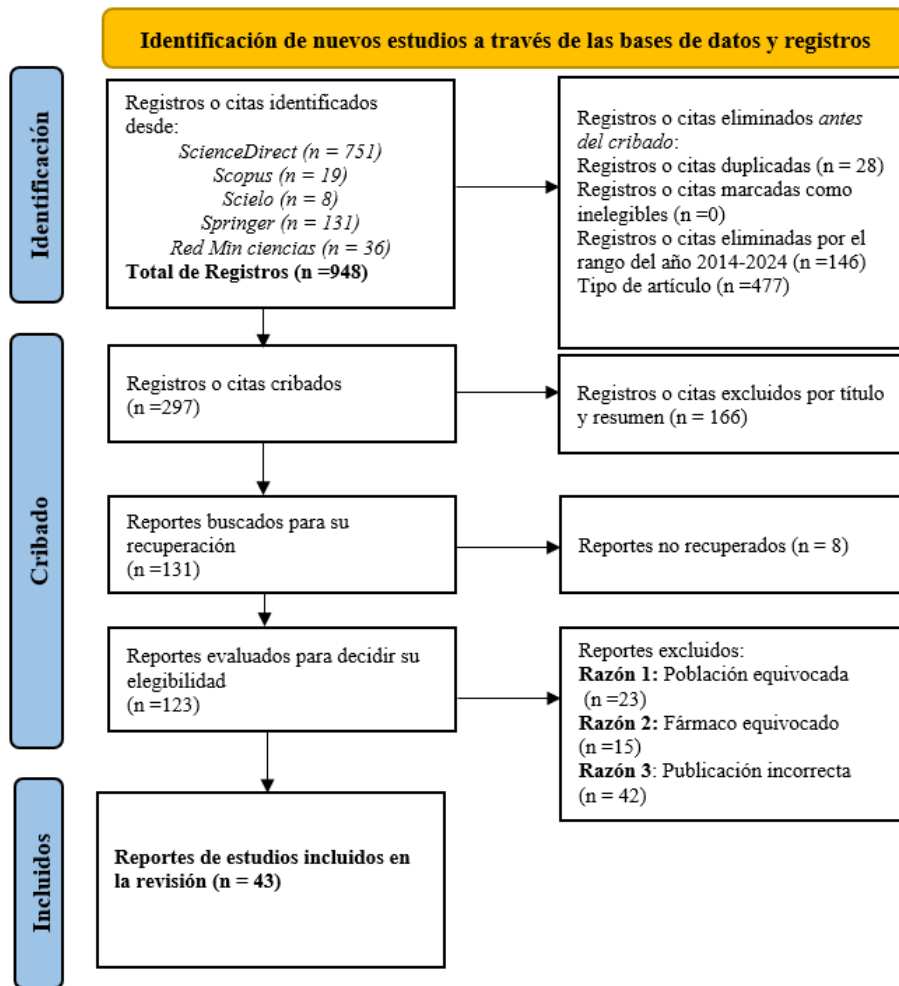
Base de datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
	("Degradation") AND ("technologies") AND ("methods") AND ("Colombia")	
<i>Scopus</i>	'Emerging pharmaceutical contaminants" OR "Emerging pharmacological pollutants" AND " Colombia"	15
	TITLE-ABS-KEY ((emerging AND contaminants) AND (pharmaceuticals) AND (removal) AND (Colombia))	4
<i>Scielo</i>	((((emerging pharmaceutical contaminants) OR (emerging pharmacological pollutants)) AND (Presence)))	8
	(Emerging contaminants) AND (Pharmaceuticals) AND (removal) AND (Colombia)	0
<i>Springer</i>	(Emerging pharmaceuticals contaminants) OR (Emerging pharmacological pollutants) AND(Colombia) AND (Colombian wastewater)	37
	(Emerging contaminants) AND (Pharmaceuticals) AND (removal) AND (treatment) AND (Degradation) AND (technologies) AND (methods) AND (Colombia)	94
<i>Red MinCiencias</i>	(Contaminantes farmacéuticos emergentes) AND (Aguas residuales en Colombia)	3
<i>/La Referencia</i>	("Emerging contaminants") AND ("Pharmaceuticals") AND ("removal") AND ("treatment") AND ("Degradation") AND ("technologies") AND ("methods") AND ("Colombia)	36
Total		948

La metodología PRISMA permitió obtener en las bases de datos un total de 948 resultados, se eliminaron 146 artículos que no estaban en el rango de año de publicación, comprendido entre los años 2014 y 2025, quedando un total de 802 documentos. De estos, se excluyeron 477 documentos que no pertenecían al tipo de artículo de interés, como se explica en la Tabla 1. Dicho esto, se cargaron en total 325 artículos al software *Zotero*, en formato .RIS, donde se removieron 28 documentos duplicados. Posteriormente, se importaron las referencias a la web *Rayyan* para su revisión. Después de realizar la lectura por título y resumen, se descartaron y filtraron 254 documentos teniendo en cuenta los criterios de selección, incluyendo los 5 documentos sin acceso.

Aplicando el protocolo PRISMA 2020 como estrategias de búsqueda, sólo 43 documentos cumplieron los criterios de la presente revisión bibliográfica y fueron incluidos para un análisis detallado de la información presentada sobre CE de origen farmacéutico en los ecosistemas acuáticos colombianos, mencionando los métodos de detección y eliminación de estos compuestos emergentes. Las etapas y resultados del proceso descrito se representan en el diagrama de flujo de la Figura 2.

Figura 2.

Diagrama de flujo PRISMA 2020



4.2 Análisis bibliométrico

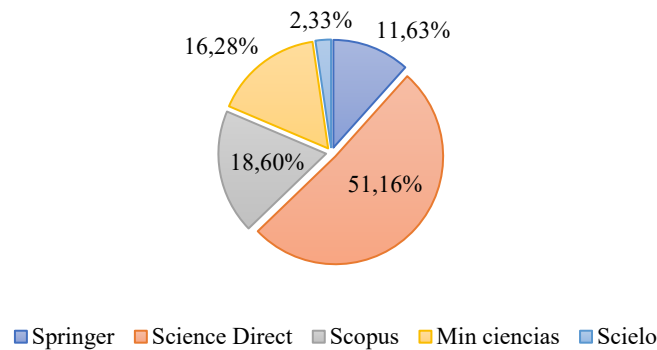
Finalmente, seleccionados y leídos en totalidad los 43 artículos incluidos en la revisión, se utilizó Microsoft Excel con el fin de tabular la información según autores, año de publicación, base datos consultada, revista de origen y número de citas por artículo. De esta manera, se obtuvo una perspectiva general y permitió identificar tendencias en la investigación sobre CE de origen farmacéutico presentes en Colombia, así como los métodos más utilizados para su cuantificación y eliminación en recursos hídricos.

Para la presente revisión, se referenciaron 14 autores que presentan investigaciones realizadas en Colombia relacionados al tema de interés, 16 documentos se utilizaron para dar respuesta al segundo y tercer objetivo de la investigación, los documentos restantes se utilizaron para la redacción y referencias de cada una de las partes de la revisión sistemática.

En la Figura 3, se muestra la distribución de los artículos consultados en el periodo comprendido entre el año 2014 y 2025, evidenciando un interés y actualidad del tema de los CE de origen farmacéutico. Durante la pandemia del Covid-19, en los años 2019 y 2021, se incrementó el uso de medicamentos para atender a la población afectada, por consiguiente, los desechos de estos fármacos crecieron. La claritromicina y la eritromicina, se utilizaron para tratar las infecciones respiratorias y el diclofenaco para el tratamiento de inflamaciones y dolores varios (Buitrago-González et al., 2024). En ese contexto, se ha observado un aumento en las investigaciones y publicaciones relacionadas a la detección y nuevas estrategias de eliminación de los compuestos farmacéuticos emergentes en los sistemas de tratamiento de agua residuales.

Figura 3.*Distribución de artículos por año*

De las bases de datos consultadas para la investigación, ScienceDirect proporcionó la mayor cantidad de documentos incluidos en la revisión de CEs de origen farmacéutico, con un 51,16 % y en segundo lugar Scopus con un 18,60 % del total de las publicaciones incluidas, como se muestra en la Figura 4. El acceso a estas bases de datos se realizó mediante los recursos electrónicos proporcionados por la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Figura 4.*Distribución de bases de datos consultadas*

Se seleccionaron los seis artículos y autores más citados referente al tema de investigación. En la Tabla 3, se organizaron los seis documentos con mayores referencias, donde se resaltan aquellos que han contribuido en el análisis de CEs de origen farmacéutico. La selección de estos documentos se realizó con base en los resultados arrojados por las métricas de cada una de las bases de datos, considerando el número de citas.

En Colombia, los autores más destacados en la detección y cuantificación de la presencia de fármacos en aguas residuales son Botero-Coy y Serna-Galvis, con 220 y 152 citaciones respectivamente, como se muestra en la Tabla 3. Se destaca la colaboración de Botero-Coy con otros autores en la investigación sobre la presencia de CEs en aguas residuales hospitalarias y efluentes de PTAR municipales presentando un panorama general en el medio acuático colombiano, contribuyendo significativamente al conocimiento sobre futuras investigaciones para el control y regulación de estos compuestos emergentes con el propósito de impulsar estrategias de mitigación.

Tabla 3.

Artículos con más citaciones

Artículo	Autores	Año	Base de datos	Revista	Citaciones
LC-QTOF MS screening of more than 1,000 licit and illicit drugs and their metabolites in wastewater and surface waters from the area of Bogotá, Colombia	(Hernández et al., 2015)	2015	<i>Springer</i>	Analytical and Bioanalytical Chemistry	101
An investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewater	(Botero-Coy et al., 2018)	2018	<i>Scopus</i>	Science of the Total Environment	220
Photo-electro-Fenton process applied to the degradation of valsartan: Effect of parameters, identification of degradation routes and mineralization in combination with a biological system	(Martínez-Pachón et al., 2018)	2018	<i>Science Direct</i>	Sustainable Cities and Society	46

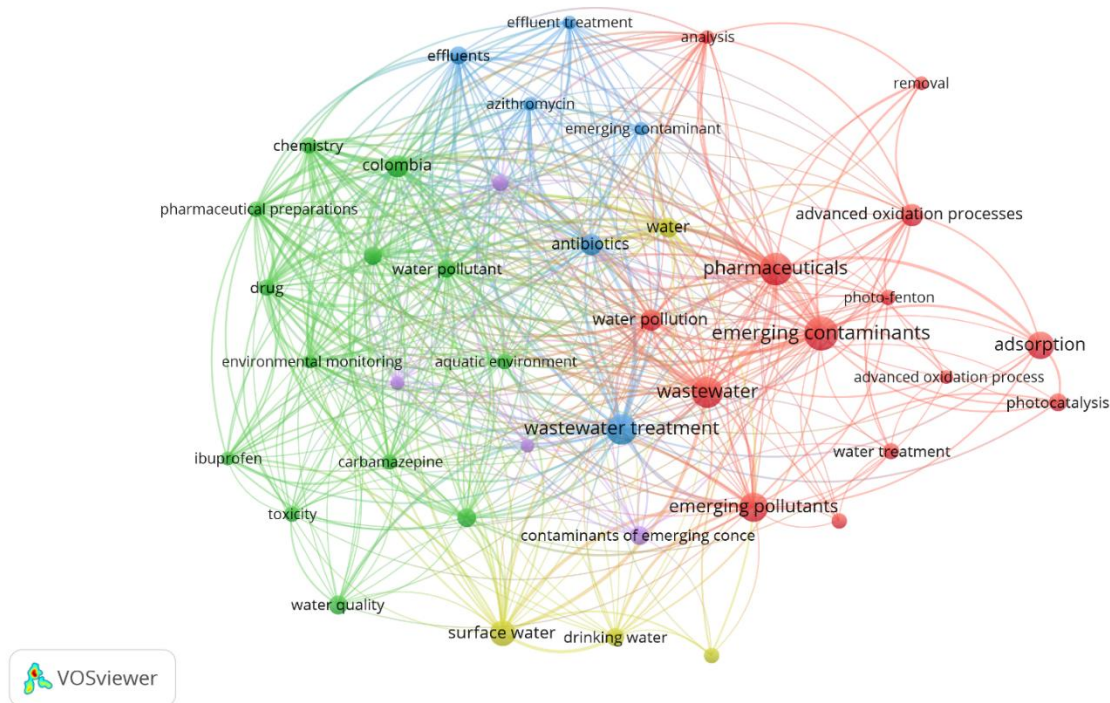
Artículo	Autores	Año	Base de datos	Revista	Citaciones
Efficient acetaminophen removal from water and hospital effluents treatment by activated carbons derived from Brazil nutshells	(Lima et al., 2019)	2019	<i>Science Direct</i>	Journal of Hazardous Materials	171
Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes	(Serna-Galvis et al., 2019)	2019	<i>Scopus</i>	Water Research	152
Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands	(Delgado et al., 2020)	2020	<i>Science Direct</i>	Water Research	71

En la Figura 5, se representa la relación de coocurrencia de palabras claves que aparecen con mayor frecuencia en la investigación, destacándose términos como: *pharmaceuticals*, *emerging contaminants*, *wastewater treatment* y *emerging pollutants*.

En el clúster rojo se identifica la interconexión de estas palabras claves con los principales métodos de depuración como *adsorption*, *photocatalysis*, *advanced oxidation processes*. Es importante destacar la conexión temática debido a la cercanía que existe entre los nodos *emerging contaminants* y *photo-fenton*, lo que sugiere que estos términos aparecen frecuentemente en los documentos seleccionados. Por otro lado, en el clúster verde se agrupan fármacos como el ibuprofeno y la carbamazepina unidos al nodo de Colombia, lo que indica una conexión de estos compuestos dentro del contexto nacional.

Figura 5.

Mapa de la relación de palabras claves en VosViewer



4.3 Contaminantes Emergentes de origen farmacéutico en Colombia

La aparición de los fármacos en los cuerpos de agua se debe a que su metabolización en los seres humanos no siempre es completa, y, por lo tanto, gran parte se excretan en distintos porcentajes (Delgado Espinosa, 2019) a través de la orina o las heces. Lo que indica que se pueden encontrar altas concentraciones de compuestos farmacológicos en vertimientos no solo de industrias farmacéuticas, sino también de hospitales, aguas domésticas e incluso en las mismas plantas de tratamientos de agua residual, el cual puede generar impacto en la salud humana y daños en la biota acuática. (María Eugenia Buitrago-González et al., 2024).

Recientemente, se ha empezado a investigar los impactos de la acumulación de estas sustancias en recursos hídricos. Según Morin-Crini et al., (2022) Colombia está avanzando en la detección y cuantificación de contaminantes emergentes para establecer una lista de sustancias

prioritarias adaptada a la región latinoamericana. Estos estudios han contribuido a mejorar la comprensión y dinámica de los compuestos emergentes objetivos, lo que resulta clave para evaluar su impacto ambiental y establecer regulaciones adaptadas al contexto local.

La metodología empleada por los autores referenciados se basó en la identificación de compuestos farmacológicos encontrados en: Planta de tratamiento aguas residuales (PTAR), Agua Residual Hospitalaria (HWW), Agua Superficial (AS) y Distrito de Riego (DR). En total, se identificaron y cuantificaron 42 compuestos farmacéuticos en Colombia.

Con base a los resultados de la revisión bibliográfica y documentos seleccionados para responder a una de las preguntas de investigación: *¿Cuáles son los fármacos con mayor presencia en los recursos hídricos colombianos?* Se elaboró un listado de los compuestos farmacéuticos detectados en las cuencas hidrográficas de Colombia, organizados según el autor, componente encontrado y lugar de detección, como se listan en la Tabla 4.

Desafortunadamente, las PTAR convencionales no eliminan de manera eficiente estos compuestos farmacéuticos, y pueden permanecer en las aguas residuales en concentraciones similares, o incluso superiores a la de los afluentes. En el estudio realizado por Botero-Coy et al. (2018) encontró que, después del tratamiento de aguas residuales en Bogotá y Medellín, no se eliminaron por completo el metronidazol, el sulfametoxazol y la trimetoprima, permaneciendo concentraciones significativas en los efluentes, incluso concentraciones más altas que en el afluente. Por ejemplo, para el metronidazol en Bogotá se reportaron concentraciones en el afluente de 0,31 ($\mu\text{g/L}$), y el efluente de 0,32 ($\mu\text{g/L}$), en Medellín las concentraciones fueron de 0,193 ($\mu\text{g/L}$), para el afluente y 0,26 ($\mu\text{g/L}$) para el efluente.

En otra investigación realizada por Hernández et al. (2015) en el efluente de la PTAR-El Salitre en Bogotá, también reportó la presencia de metronidazol, el sulfametoxazol y la

trimetoprima. En el caso del metronidazol, la concentración en efluente fue de 0,19 ($\mu\text{g/L}$). Al comparar estos resultados de la concentración del efluente del metronidazol detectadas por Botero-Coy et al. (2018), se puede evidenciar que, en un periodo de tres años, la concentración del metronidazol en el efluente de la PTAR- El Salitre aumentó en 0,13 ($\mu\text{g/L}$). Esto evidencia que la PTAR no mejoró sus procesos de tratamiento de eliminación. Además, el incremento de la densidad poblacional en la ciudad de Bogotá ha provocado una mayor carga de aguas residuales.

Tabla 4.

Reporte de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en Colombia

Artículo	Autor	Origen	Ubicación	Componente encontrado
An Initial Approach to the Presence of Pharmaceuticals in Wastewater from Hospitals in Colombia and Their Environmental Risk.	(Serna-Galvis, Botero-Coy, et al., 2022)	Agua residual hospitalaria (HWW)	Medellín, Manizales y Tumaco	Acetaminofén, Ácido nalidixico, Atorvastatina, Ácido oxolínico, Azitromicina, Ciprofloxacina, Clindamicina, Diclofenaco, Enalapril, Fenazona, Flumequina, Gabapentina, Iopromida, Irbesartan, Levamisol, Lincomicina, Lorazepam, Losartan, Metoprolol, Metronidazol, Norfloxacina, Omeprazol, Primidona, Salbutamol, Sildenafil, Sulfadiazina, Sulfametoxazol, Tramadol, Trimetoprima.
Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes.	(Serna-Galvis et al., 2019)	Planta de tratamiento de agua residual (PTAR)	Bogotá, El Salitre	Azitromicina, Carbamazepina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Eritromicina, Ibersartan, Losartan, Metronidazol, Norfloxacina, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Valsartán, Venlafaxina.
An investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewater	(Botero-Coy et al., 2018)	Agua residual hospitalaria (HWW) y PTAR, afluentes - efluentes	Tumaco (HWW) San Andrés Hospital. Florencia, Caquetá (Descarga de agua residual). Bogotá y Medellín (PTAR)	Acetaminofén, Azitromicina, Carbamazepina, Ciprofloxacina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Doxiciclina, Eritromicina, Ibersartan, Losartan, Metronidazol, Naproxeno, Norfloxacina, Sulfametoxazol, Tetraciclina, Trimetoprima, Valsartán, Venlafaxina.

Artículo	Autor	Origen	Ubicación	Componente encontrado
Elimination of contaminants of emerging concern and their environmental risk in world-real municipal wastewater by electrochemical advanced oxidation processes.	(Martínez-Pachón et al., 2022)	Planta de Tratamiento de Agua (PTAR)	Bogotá, El Salitre	Azitromicina, Carbamazepina, Ciprofloxacina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Eritromicina, Ibersartan, Losartan, Metronidazol, Norfloxacin, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Valsartán, Venlafaxina.
Environmental risk assessment of pharmaceutical pollutants in the Oro River Sub-basin (Colombia).	(Cerón-Vivas & Peñuela Mesa, 2024)	Río de Oro aguas abajo de la PTAR	Área Metropolitana Bucaramanga	Carbamazepina, Cefalexina, Ibuprofeno.
High resolution mass spectrometry-based screening for the comprehensive investigation of organic micropollutants in surface water and wastewater from Pasto city, Colombian Andean highlands.	(Hernández et al., 2024)	Agua superficial y Agua Residual vertidas al río Pasto.	Pasto	Acetaminofén, Azitromicina, Carbamazepina, Cefalexina, Cetirizina, Claritromicina, Diclofenaco, Lincomicina, Losartan, Metronidazol, Naproxeno, Sulfametoxazol, Trimetoprima.
Assessment of water quality and emerging pollutants in two fish species from the mallorquin swamp in the Colombian Caribbean.	(Elles-Pérez et al., 2024)	Ciénega de Mallorquín.	Barranquilla	Acetaminofén, Ibuprofeno.
Monitoring pharmaceuticals and personal care products in water and fish from the Gulf of Urabá, Colombia.	(Pemberthy M et al., 2020)	Agua de mar	Turbo, Golfo de Urabá (Caño Aduana, Caño Casanova, Caño Higinio y Puerto Waffe)	Ibuprofeno, Diclofenaco.
Evaluation of ibuprofen and diclofenac in the main rivers of Colombia and striped catfish <i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	(Gallego-Ríos et al., 2021)	Río Cauca y Río Magdalena.	Río Magdalena (Barranca-bermeja, Puerto Serviez, Puerto Triunfo). Río Cauca (Caucasia, La Apartada, Nechí)	Ibuprofeno, Diclofenaco.

Artículo	Autor	Origen	Ubicación	Componente encontrado
LC-QTOF MS screening of more than 1,000 licit and illicit drugs and their metabolites in wastewater and surface waters from the area of Bogotá, Colombia.	(Hernández et al., 2015)	Río Tunjuelo y La Ramada (Agua Superficial) y Agua Residual PTAR.	Bogotá, El Salitre. Río Tunjuelo y La Ramada	Acetaminofén, Carbamazepina, Claritromicina, Clindamicina, Diclofenaco, Gabapentina, Gemfibrozil, Ibersartan, Ibuprofeno, Iopromida, Ketoprofeno, Levamisol, Lincomicina, Losartan, Metronidazol, Naproxeno, Salbutamol, Sulfametoxazol, Trimetoprima, Valsartán
Evaluación de las concentraciones de acetaminofén presentes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y su efecto tóxico sobre el Allium Cepa	(Quintero, 2020)	Agua Residuales (PTAR)	Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) Bucaramanga	Acetaminofén.
Presencia de contaminantes emergentes (CE) en los distritos de riego del departamento de Córdoba, Colombia.	(Florez et al., 2021)	Muestras de agua de los distritos de riego	Riego Mocarí en Montería y distrito de riego la Doctrina en el municipio de Lorica.	Carbamazepina, Gemfibrozil, Ibuprofeno.
Productos farmacéuticos y de cuidado personal presentes en aguas superficiales, de consumo humano y residuales en el departamento de Córdoba, Colombia.	(Flórez et al., 2021)	Río Sinú, Agua de consumo humano y Agua residual doméstica.	Córdoba, Montería. Río Sinú,	Gemfibrozil, Ibuprofeno, Naproxeno.
Diagnóstico y remoción de contaminantes emergentes en aguas superficiales y cloacales.	(Delgado Espinosa, 2019).	Afluentes y efluentes de planta potabilizador (PTAP) y tratamiento de aguas residuales (PTAR)	Popayán, Cali	Carbamazepina, Sildenafil.

4.3.1 Clasificación de los fármacos reportados en Colombia según su uso terapéutico.

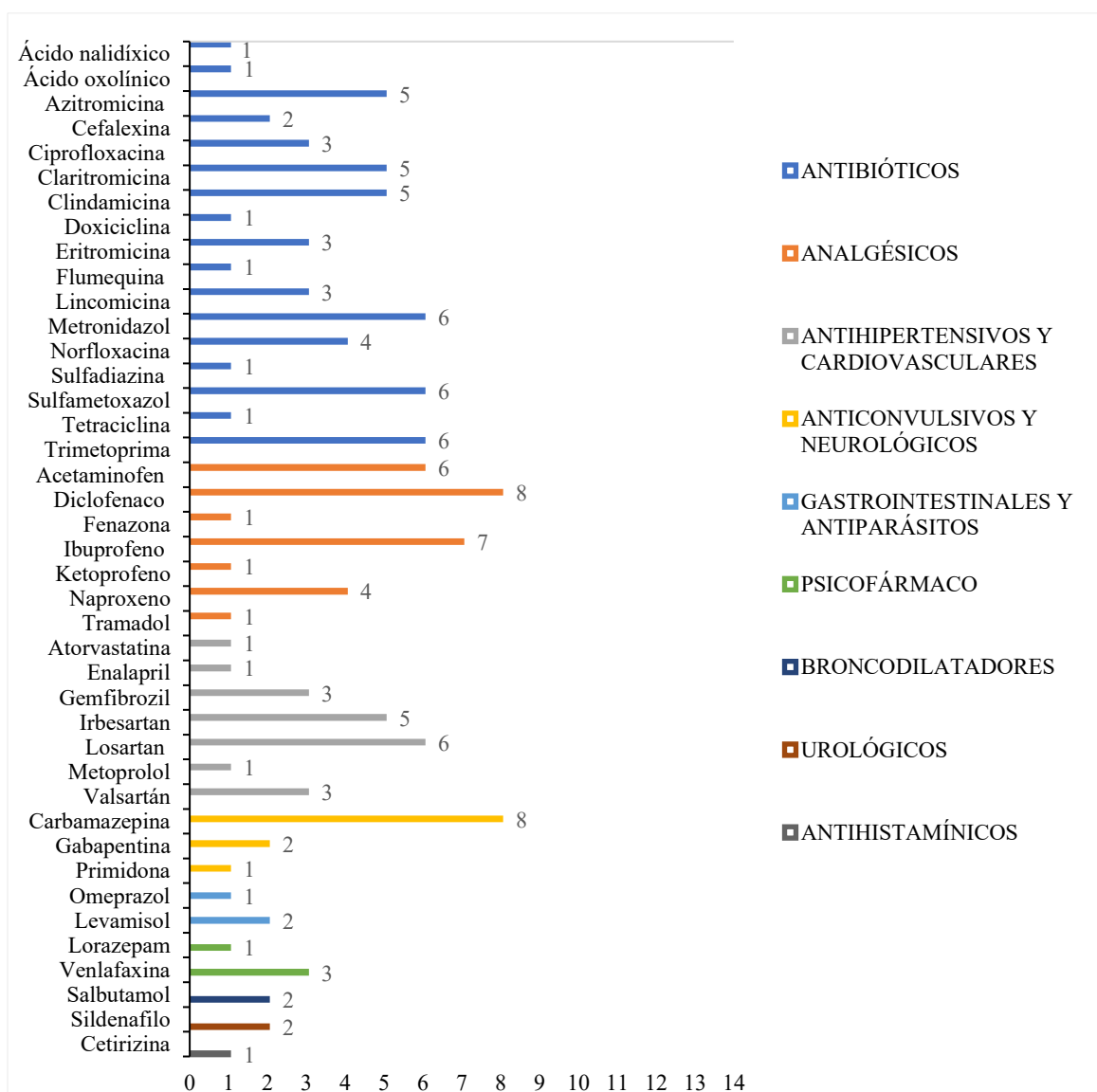
Las muestras de agua recolectadas en las distintas regiones de Colombia por los autores han permitido identificar y clasificar los compuestos farmacéuticos frecuentemente detectados

según su uso terapéutico.

Dicha clasificación se presenta en la Figura 6, refleja la distribución de estos fármacos según su uso habitual, y la cantidad de artículos realizados por los 14 autores seleccionados para este primer objetivo. Esto permite identificar qué grupos farmacológicos y cuál CE farmacéutico son los más recurrentes en los cuerpos de agua analizados en Colombia.

Figura 6.

Clasificación y ocurrencia de los fármacos detectados según su uso terapéutico.



Al analizar los resultados de la revisión bibliográfica se destaca que, para Colombia, los niveles más altos se encontraron para el grupo de los antibióticos, concretamente la azitromicina, el ciprofloxacino, la claritromicina, la clindamicina y el norfloxacino, con concentraciones superiores a 10 µg/L. Esto se evidenció en varias muestras de aguas residuales hospitalarias cuantificadas para el caso del Hospital San Andrés en Tumaco (Botero-Coy et al., 2018). El sulfametoxazol y la trimetoprima se reportaron con mayor frecuencia en el grupo de los antibióticos. Estos tipos de antibióticos son medicamentos utilizados para el tratamiento de enfermedades infecciosas causadas por bacterias (Hernández et al., 2024).

Las aguas residuales hospitalarias se consideran un punto de acceso importante en términos de carga de productos farmacéuticos, lo que ha llevado a la comunidad científica a cuestionarse sobre la práctica de descarga directa de las aguas residuales hospitalarias en los sistemas de alcantarillados públicos o al ser liberados al ambiente sin un tratamiento previo (Serna-Galvis, Botero-Coy, et al., 2022), como ocurre para el caso del hospital de Tumaco, que no cuenta con plantas de tratamiento de aguas residuales, por lo que el agua contaminada (por ejemplo, el agua hospitalaria) se descarga directamente a las fuentes de agua superficiales y al mar (Botero-Coy et al., 2018).

En el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), (Cerón-Vivas & Peñuela Mesa, 2024) monitorearon diferentes puntos de la sub cuenca del río de Oro, con el objetivo de evaluar la presencia de componentes de productos farmacéuticos. Este río recibe todos los vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales del AMB, lo que lo convierte en el de mayor nivel de contaminación de esta zona. El Ibuprofeno y Cefalexina se encontraron en concentraciones relevantes en todos los sitios de monitoreo investigados. Las concentraciones de Ibuprofeno detectadas oscilaron entre 1,83 µg/L y 3,156 µg/L, mientras que, la Cefalexina osciló entre 0,5

$\mu\text{g/L}$ y $12,9 \mu\text{g/L}$. Las concentraciones más altas en los puntos de muestreo fueron significativas debido a la presencia de grandes áreas hospitalarias en la zona de Floridablanca, que es una ciudad que se ha posicionado internacionalmente como destino para el turismo de salud gracias a clínicas reconocidas internacionalmente. No se detectó ni cuantificó la presencia de diclofenaco y doxiciclina en el río de Oro.

Para el caso de los medicamentos como el acetaminofén, ibuprofeno, losartan y carbamazepina; reportaron mayor frecuencia de detección, estos resultados pueden explicarse por la disponibilidad de estos fármacos como medicamentos no prescritos y la práctica de la automedicación por parte de la gente (Cerón-Vivas & Peñuela Mesa, 2024). En Colombia, el ibuprofeno ocupa el segundo lugar en registros de salud otorgados, el 57 % de las ventas son con receta y el resto sin receta, mientras que, el diclofenaco tiene el mayor número de registros de salud otorgados, el 89 % de las ventas se realizan con receta y el resto sin receta (Gallego-Ríos & Peñuela, 2021).

La presencia del ibuprofeno y el diclofenaco se detectaron en los ríos Magdalena, Cauca, Sinú y en el Golfo de Urabá. En tres sitios del río Cauca se presentaron niveles de diclofenaco de $12,20 \mu\text{g/L}$ a $75,04 \mu\text{g/L}$ en época seca. Mientras tanto, en el río Magdalena, tres sitios de muestreo tuvieron concentraciones de diclofenaco en un rango de 0.68 a $7.35 \mu\text{g/L}$ en el período de transición entre época de lluvia y época seca. Las concentraciones más altas se encontraron en la estación seca, donde posiblemente haya una mayor concentración de diclofenaco debido a la disminución del nivel de agua en los ríos (Gallego-Ríos & Peñuela, 2021) mientras que en época de lluvias estos fármacos pueden diluirse fácilmente; sin embargo, es importante tener en cuenta que la capacidad de dilución de los ríos en Colombia no es lo suficientemente alta (Delgado Espinosa, 2019). Para el río Sinú, el ibuprofeno fue el compuesto que se detectó con mayor

frecuencia, lo que se podría relacionar con alto consumo de este analgésico por parte de la población, es necesario resaltar que el río Sinú, a lo largo de su cauce, recibe la carga de contaminantes de nueve municipios, algunos de los cuales no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales (Flórez et al., 2021). En el Golfo de Urabá se cuantificaron concentraciones medias de diclofenaco e ibuprofeno dentro del rango de 0,12-1,54 $\mu\text{g/L}$ y 0,12-0,46 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. La mayor incidencia de contaminantes puede estar relacionada con las zonas con mayor número de habitantes, los puertos de navegación cercanos y la zona de eliminación, correspondientes a la estación de la Aduana, la estación de Casanova y la estación de la Hidromarina. Además, el Golfo de Urabá es un cuerpo de agua semicerrado y su tasa de movilidad y reposición de agua es relativamente lenta (Pemberthy M et al., 2020).

4.3.2 Distribución de los puntos de muestreo y priorización de fármacos

Los sitios de monitoreo en Colombia comprendieron un total de 19 puntos de distribución, en los cuales los autores seleccionados para esta investigación analizaron diferentes muestras de agua distribuidos en 10 departamentos del país. En la Figura 7, se observan los sitios donde se identificaron y cuantificaron CEs de origen farmacéutico.

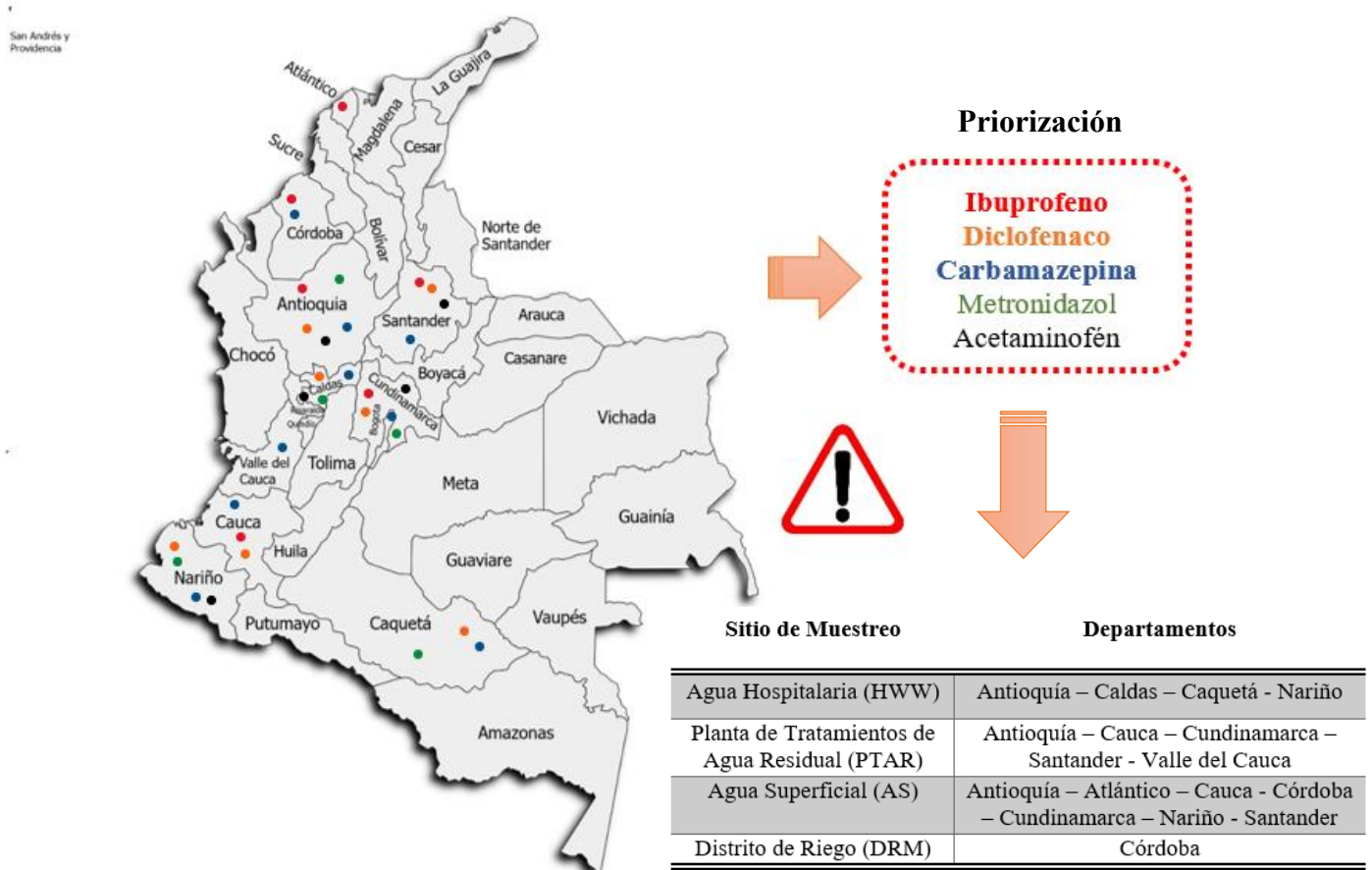
De los fármacos reportados en la matriz de estudio, se identificó que el diclofenaco, ibuprofeno y la carbamazepina se encontraron con una frecuencia de aparición mayor que los otros fármacos identificados y cuantificados por los autores seleccionados en la investigación. Tanto el diclofenaco como la carbamazepina se identificaron en gran medida en Aguas Residuales Hospitalarias (HWW), y el ibuprofeno en las Plantas de Tratamiento de Agua Residuales (PTAR).

El Distrito de Riego (DRM) de cultivos asociados a la cuenca del río Sinú, ubicado en el Municipio de Lorica, departamento de Córdoba; en la investigación realizada por Florez et al., (2021) reportó la presencia de carbamazepina, gemfibrozil e ibuprofeno.

Debe mencionarse que las PTAR municipales y/o los sistemas biológicos como lodos activados alcanzan una remoción parcial de los antibióticos y otros fármacos, por lo cual se encuentran estas sustancias en sus efluentes, haciendo que las PTAR actúen como concentradores de algunas sustancias farmacéuticas (Serna-Galvis, Martínez-Mena, et al., 2022b). Por lo tanto, los efluentes descargados en agua superficiales pueden contener una amplia variedad de estos compuestos farmacéuticos (Hernández et al., 2024).

Figura 7.

Distribución de los puntos de muestreo y lista de priorización de fármacos.



Nota. Adaptado de Rodríguez-Rodríguez *et al.* (2024)

4.4 Métodos de cuantificación y tecnologías de eliminación para contaminantes emergentes de origen farmacéutico.

En las últimas décadas, los CEs derivados de productos farmacéuticos se han convertido en una preocupación significativa para la gestión de los recursos hídricos, estos compuestos provienen principalmente del consumo humano y el desecho inadecuado de medicamentos.

La detección a menudo es compleja debido a la baja concentración y naturaleza química de los compuestos, esta identificación ha sido posible gracias al avance de técnicas analíticas sofisticadas, como la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas y sus variantes, las cuales ofrecen alta sensibilidad y precisión en la cuantificación (Hlengwa & Mahlambi, 2020). Los procesos de oxidación avanzada, entre los que destacan la fotocatalisis y la oxidación electroquímica, han demostrado ser tratamientos convencionales efectivos en la degradación de estos compuestos en diversos estudios. También, se han implementado nuevas tecnologías como los reactores electroquímicos y sistemas basados en energía solar (Letsoalo et al., 2023).

El estudio de estas tecnologías emergentes ayuda a perfilar soluciones viables y sostenibles no solo desde una perspectiva técnica y ambiental, sino también como herramientas clave para abordar desafíos específicos en el contexto colombiano, un país con problemas recurrentes de contaminación en fuentes de agua y es fundamental adaptar estas tecnologías a las necesidades locales. Estas adaptaciones no solo contribuyen a mitigar los impactos negativos en el medio ambiente, sino que también fortalecen el desarrollo sostenible del país, mejorando la calidad de vida de la población (Ahmadi et al., 2025).

En respuesta a la segunda pregunta de investigación *¿Cómo los métodos de detección y eliminación contribuyen al adecuado manejo de estos contaminantes químicos?* se elaboró un listado detallado de las tecnologías de detección documentados en la revisión bibliográfica,

organizados por autor y componente estudiado, presentados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Reporte de métodos de cuantificación y tecnologías de eliminación para contaminantes emergentes de origen farmacéutico.

Artículo	Autores	Fármaco estudiado	Método de cuantificación	Tecnología de eliminación
Degradation of diclofenac aqueous solutions in a 3D electrolytic reactor using carbon-based materials as pseudo third electrodes in fluidized bed, anodic and cathodic configurations.	(Acuña-Bedoya et al., 2022)	Diclofenaco	Espectrofotometría UV-visible	Electro oxidación Avanzada en Reactor Electrolytico 3D.
Sulfamethoxazole mineralization by solar photo electro-Fenton process in a pilot plant	(Murillo-Sierra et al., 2018)	Sulfametoxazol	Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC)	Oxidación Avanzada (proceso solar foto-electro-Fenton (SPEF))
Coupling of heterogeneous photocatalysis and photosensitized oxidation for diclofenac degradation: role of the oxidant species	(Díaz-Angulo et al., 2019)	Diclofenaco	Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC)	Fotocatálisis heterogénea y la oxidación fotosensibilidad
Effective treatment of hospital wastewater with high-concentration diclofenac and ibuprofen using promising technology based on degradation reaction catalyzed by Fe ⁰ under microwave irradiation	(Vieira et al., 2021)	Diclofenaco e ibuprofeno	Cromatografía Líquida de Ultra Alta Eficiencia (UHPLC)	Remediación con hierro cero Valente (Fe ⁰)
Degradation of carbamazepine by the photo-Fenton process. Approach towards the elucidation of degradation by-products	(Parra-Enciso et al., 2023)	Carbamazepina	Cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC), espectrometría de masas (MS) y la resonancia magnética nuclear (RMN)	Oxidación avanzada (foto-Fenton)
Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands	(Delgado et al., 2020)	Carbamazepina y Sildenafil	Cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (UPLC-MS/MS)	Absorción por humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (CWHSF)

Artículo	Autores	Fármaco estudiado	Método de cuantificación	Tecnología de eliminación
Use of simulated sunlight radiation and hydrogen peroxide in azithromycin removal from aqueous solutions: Optimization & mineralization analysis	(Cano et al., 2020)	Azitromicina	Cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (UPLC-MS/MS) combinando radiación solar simulada y peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂).	Oxidación avanzada (AOP)
A hydrodynamic cavitation prototype reactor evaluation for decreasing cephalexin concentration in aqueous solution	(Devia-Orjuela, Agudelo-Carrascal, et al., 2024)	Cefalexina	Espectrofotometría	Cavitación hidrodinámica (HC) con procesos de oxidación avanzada (AOPs)
Innovative chitosan/graphene oxide composites: A thermodynamic and calorimetric approach to pharmaceutical waste removal from water	(Giraldo et al., 2025)	Ketorolaco Trometamina, Ácido Mefenámico y Levetiracetam	Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)	Adsorción con bioadsorbentes basados en quitosano y óxidos de grafeno
Evaluation and analysis of the adsorption mechanism of three emerging pharmaceutical pollutants on a phosphorised carbon-based adsorbent: Application of advanced analytical models to overcome the limitation of classical models	(Dhaouadi et al., 2024)	Sulfametoxazol, Ketoprofeno y Carbamazepina	Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)	Adsorción con adsorbente a base de fósforo y carbono (PCA)
Efficient acetaminophen removal from water and hospital effluents treatment by activated carbons derived from Brazil nutshells	(Lima et al., 2019)	Paracetamol (acetaminofén)	Espectrofotometría UV-Vis	Adsorción con carbón activado
Photo-electro-Fenton process applied to the degradation of valsartan: Effect of parameters, identification of degradation routes and mineralization in combination with a biological system	(Martínez-Pachón et al., 2018)	Valsartán	Cromatografía líquida de ultra alta resolución acoplada a espectrometría de masas (UHPLC-HRMS)	Oxidación Avanzada (foto-electro-Fenton) combinado con un sistema biológico (PEF-BP).
Analysis of hydrodynamic cavitation intensified with ozone and UV radiation to decrease the concentration of carbamazepine in aqueous solution	(Devia-Orjuela, Castillo Córdoba, et al., 2024)	Carbamazepina	Espectrofotometría UV-Vis	Cavitación hidrodinámica intensificada con radiación UV y ozono (HC+UV+O ₃)
Effects of 17 α -ethinyl estradiol (EE2) and removal potential by two microalgal species <i>Chlorella vulgaris</i> and <i>Scenedesmus obliquus</i>	(Pazmino-Sosa et al., 2024)	17 α -etinilestradiol (EE2)	Cromatografía líquida de ultra alta presión (UPLC)	Degradación biológica mediada por microalgas

Artículo	Autores	Fármaco estudiado	Método de cuantificación	Tecnología de eliminación
Efficient removal of pharmaceutical contaminants using laccase immobilized on activated coal derived from cashew nut shells: Thermodynamic, kinetic and calorimetry study	(Guerrero-Fajardo et al., 2025)	Diclofenaco sódico, amoxicilina y Carbamazepina	Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)	Adsorción con carbones activados impregnados con enzima lacasa
Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes	(Serna-Galvis et al., 2019)	Diclofenaco, carbamazepina, valsartán, losartán, sulfametoxazol ciprofloxacino, norfloxacino, metronidazol, claritromicina, azitromicina, eritromicina y trimetoprim	Cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS)	Oxidación avanzada (degradación sonoquímica complementada con procesos sono-Fenton, sono-photo-Fenton y sono-photo-Fenton/ácido oxálico)

4.4.1 Métodos de cuantificación

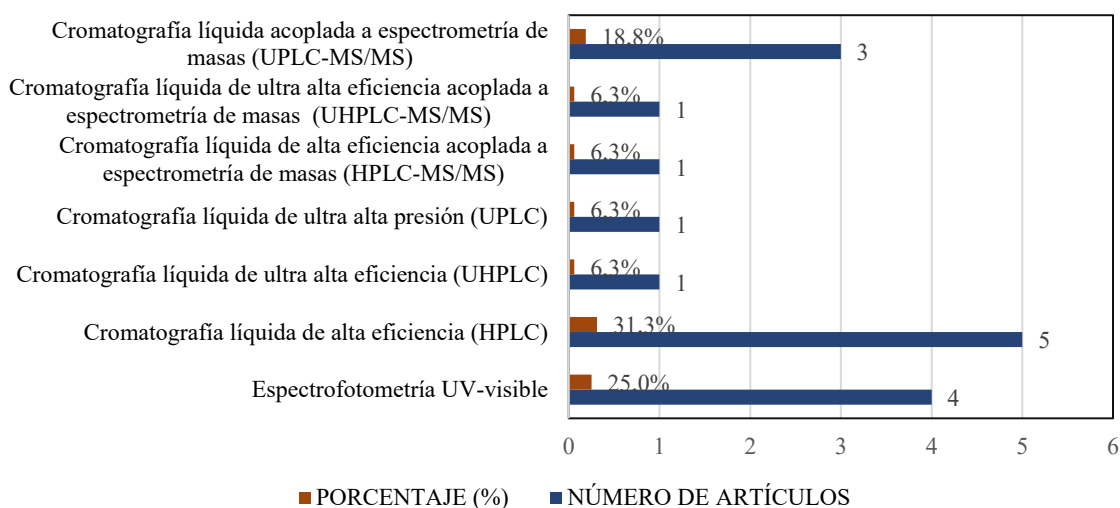
En el estudio de los CE de origen farmacéutico, la cuantificación precisa y la caracterización en matrices acuáticas son pasos fundamentales para entender el impacto en los recursos hídricos. La diversidad química de estos compuestos junto con la presencia en concentraciones traza, requiere el uso de metodologías analíticas avanzadas que permitan su identificación y monitoreo de manera eficaz. Mediante el análisis de la literatura científica, se registraron los métodos más utilizados para la detección de estos contaminantes.

Los métodos de cuantificación e identificación utilizados en la detección de contaminantes farmacéuticos reflejan el avance tecnológico en la caracterización de estos compuestos en matrices acuáticas. En la Figura 8, se observa que el método más empleado es la Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC), con un 31.3 % de los artículos consultados. Este método se destaca por su alta sensibilidad y precisión, atributos que le permiten identificar y cuantificar contaminantes

farmacéuticos incluso en matrices ambientales complejas como aguas residuales y lodos de depuración. Además, la robustez del HPLC lo posiciona como una herramienta imprescindible para superar los desafíos analíticos asociados con la detección de fármacos en concentraciones traza. Su capacidad de separación y análisis permite monitorear eficazmente los riesgos ambientales y facilita el diseño de estrategias para la mitigación de la contaminación farmacéutica. Por estas características, el HPLC es considerado el estándar de oro para el análisis de contaminantes emergentes en ambientes acuáticos (Cañus-Makowska et al., 2023).

Figura 8.

Métodos de detección y cuantificación.



Por otro lado, la espectrofotometría UV-visible constituye el 25.0 % de los métodos reportados. Esta técnica se ha consolidado como una herramienta accesible y de amplio uso para la detección y cuantificación de contaminantes emergentes en matrices ambientales. Sus principales ventajas incluyen su bajo costo, facilidad de operación y capacidad para ofrecer resultados rápidos en análisis de compuestos orgánicos e inorgánicos en medios acuosos. Sin embargo, su utilidad se ve limitada por su falta de selectividad, especialmente cuando se enfrentan

compuestos con estructuras químicas similares. Esta limitación resalta la necesidad de complementar su uso con técnicas analíticas más avanzadas como la cromatografía o la espectrometría, que permiten una mayor resolución y precisión en la identificación de contaminantes en matrices complejas (Lodeiro et al., 2017).

Las técnicas híbridas, como HPLC-MS/MS (6.3 %), UPLC-MS/MS (18.8 %), y UHPLC-MS/MS (6.3 %), presentan diferencias clave en términos de sensibilidad, velocidad y resolución analítica. En particular, el método HPLC-MS/MS (Berset et al., 2010), se ha mostrado eficaz para el análisis de una amplia gama de contaminantes emergentes, permitiendo la cuantificación y detección de compuestos en concentraciones desde niveles de microgramos por litro hasta nanogramos por litro, con mínima preparación de muestras. Por otro lado, el método UPLC-MS/MS, destacado por su mayor sensibilidad y velocidad, ofrece ventajas significativas en términos de reducción de tiempos de análisis y mejora en la detección de contaminantes en matrices complejas (Zhao et al., 2024). Finalmente, el método UHPLC-MS/MS, reconocido por su precisión analítica y capacidad para identificar estructuras moleculares en concentraciones ultra bajas, proporciona un rango de detección altamente lineal y sensibilidad excepcional. A pesar de sus costos operativos más altos y su requerimiento de personal calificado, esta técnica es ampliamente utilizada como referencia en estudios ambientales (Cardoso et al., 2025).

Los métodos como el UHPLC (6.3 %) y UPLC (6.3 %) ofrecen soluciones específicas para casos donde se requiere un análisis profundo de los compuestos. Aunque estas técnicas demandan equipos costosos y personal altamente capacitado, su implementación resulta esencial para generar datos confiables que respalden la regulación y monitoreo ambiental (Fountain, 2011).

4.4.2 Tecnologías de eliminación

Se elaboró un listado detallado de las tecnologías de eliminación documentadas, se les denominó "tratamientos", para simplificar su descripción. Estos tratamientos se organizaron en la Tabla 6 según su tipo y nombre, acompañados de una breve descripción que permite identificar sus principales características, tal como se detalla a continuación.

Tabla 6.

Reporte de tratamientos para la eliminación de CEs de origen farmacéutico.

Tipo de tratamiento	Tratamiento	Fármaco estudiado	Descripción del tratamiento	Autores
Biológico	Degradación biológica mediada por microalgas	17 α -etinilestradiol (EE2)	Utiliza especies como <i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Scenedesmus obliquus</i> para eliminar el 17 α -etinilestradiol (EE2) de ambientes acuáticos. Estas microalgas degradan el contaminante principalmente por mecanismos de biodegradación, reduciendo la vida media del EE2 a menos de diez días. Es un enfoque sostenible y eficiente que minimiza el impacto ambiental de este disruptor endocrino.	(Pazmino-Sosa et al., 2024)
Biológico, Químico y Físico	Absorción por humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (CWHSF)	Metilparabeno	Tratamiento de eliminación de contaminantes en donde el agua fluye bajo la superficie a través de un lecho sembrado con plantas acuáticas como <i>Heliconia Zingiberales</i> y <i>Cyperus Haspan</i> . Este método sostenible aprovecha la degradación microbiana, la sorción y la absorción por las plantas para tratar las aguas residuales.	(Delgado et al., 2020)
Físico-químico	Cavitación hidrodinámica (HC) con procesos de oxidación avanzada (AOPs)	Cefalexina	La cavitación hidrodinámica genera radicales OH mediante la implosión de burbujas al reducir el área de flujo con placas perforadas, y procesos de oxidación avanzada como radiación UV y ozono incrementa la eficiencia en la descomposición de contaminantes orgánicos persistentes, como la cefalexina, mediante la generación de puntos calientes, altas temperaturas locales y una mayor disociación de las moléculas.	(Devia-Orjuela, Agudelo-Carrascal, et al., 2024)
Físico-químico	Cavitación hidrodinámica intensificada con radiación UV y ozono (HC+UV+O ₃)	Carbamazepina	Combina la formación de radicales hidroxilos mediante la implosión de microburbujas generadas por cavitación, con la acción oxidante del ozono y la radiación UV. Este proceso permite degradar parcialmente contaminantes como la carbamazepina en soluciones acuosas. Aunque es eficaz para reducir la concentración de carbamazepina, no logra su mineralización completa.	(Devia-Orjuela, Castillo Córdoba, et al., 2024)

Tipo de tratamiento	Tratamiento	Fármaco estudiado	Descripción del tratamiento	Autores
Químico	Electro oxidación Avanzada en Reactor Electrolytico 3D.	Diclofenaco	Se emplea un reactor electrolítico tridimensional donde los electrodos tradicionales se complementan con materiales conductores basados en carbono, que actúan como pseudo-terceros electrodos. Esto mejora la eficiencia del proceso al aumentar la superficie activa y facilitar la generación de especies altamente reactivas, como radicales hidroxilos (OH), que degradan los contaminantes de manera efectiva.	(Acuña-Bedoya et al., 2022)
Químico	Oxidación Avanzada (proceso solar foto-electro-Fenton (SPEF))	Sulfametoxazol	Funciona mediante la combinación de electroquímica y energía solar: en un reactor electroquímico, el oxígeno se reduce en el cátodo para formar peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂), el cual reacciona con iones ferroso (Fe ²⁺) para generar OH en solución. La radiación solar ayuda a regenerar Fe ²⁺ , potenciando la degradación del contaminante.	(Murillo-Sierra et al., 2018)
Químico	Fotocatálisis heterogénea y la oxidación fotosensibilizada	Diclofenaco (DCF)	La fotocatálisis heterogénea usa semiconductores como TiO ₂ y ZnO para generar especies oxidantes fuertes al absorber luz UV, degradando contaminantes como el diclofenaco. La oxidación fotosensibilizada emplea fotosensibilizadores que absorben luz visible y generan oxígeno singlete, aunque con menor poder oxidante. El acoplamiento de ambos procesos mejora la eficiencia al aprovechar mejor la radiación solar y aumentar la producción de especies reactivas. Esto optimiza la degradación del DCF, superando las limitaciones individuales de cada técnica.	(Díaz-Angulo et al., 2019)
Químico	Remediación con hierro cero valente (Fe ⁰)	Diclofenaco e ibuprofeno	Se sintetizó Fe ⁰ mediante un método de reducción química con borohidruro de sodio y se caracterizó con diversas técnicas analíticas. Luego, se evaluó su capacidad para eliminar materia orgánica midiendo la reducción de DQO en el agua tratada. La eficiencia del proceso se analizó a diferentes condiciones experimentales, demostrando el potencial del Fe ⁰ para la remediación de aguas contaminadas.	(Vieira et al., 2021)

Tipo de tratamiento	Tratamiento	Fármaco estudiado	Descripción del tratamiento	Autores
Químico	Oxidación avanzada (foto-Fenton)	Carbamazepina	Proceso de oxidación avanzada que utiliza luz ultravioleta y peróxido de hidrógeno para generar radicales hidroxilos. Estos radicales degradan contaminantes persistentes en el agua, como la carbamazepina. Es un método eficiente y respetuoso con el medio ambiente debido al uso de catalizadores no tóxicos como el hierro.	(Parra-Enciso et al., 2023)
Químico	Oxidación avanzada (AOP)	Azitromicina	El tratamiento de oxidación avanzada combina radiación solar simulada con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) para generar radicales hidroxilos (OH), que degradan eficazmente compuestos orgánicos como la azitromicina. Este proceso químico avanzado permite la eliminación de contaminantes persistentes en soluciones acuosas, optimizando parámetros como pH y concentración de peróxidos.	(Cano et al., 2020)
Químico	Adsorción con bioadsorbentes basados en quitosano y óxidos de grafeno	Ketorolaco trometamina	El tratamiento de adsorción con bioadsorbentes basados en quitosano y óxidos de grafeno utiliza quitosano combinado con óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO). Estos materiales presentan alta capacidad de adsorción debido a su gran área superficial y la interacción de grupos funcionales por ello eficaces para eliminar moléculas farmacéuticas.	(Giraldo et al., 2025)
Químico	Adsorción con adsorbente a base de fósforo y carbono (PCA)	Carbamazepina	Se basa en la interacción física entre las moléculas farmacéuticas y los grupos funcionales fosforados presentes en la superficie del adsorbente. Estos grupos funcionales actúan como sitios activos capaces de formar enlaces débiles, como interacciones de Van der Waals y enlaces de hidrógeno, con las moléculas adsorbidas. La adsorción ocurre en una estructura de doble capa: una capa primaria anclada directamente a los grupos funcionales y una capa secundaria asociada por interacciones moleculares.	(Dhaouadi et al., 2024)

Tipo de tratamiento	Tratamiento	Fármaco estudiado	Descripción del tratamiento	Autores
Químico	Adsorción con carbón activado	Paracetamol (acetaminofén)	Se basa en materiales altamente microporosos producidos a partir de cáscaras de nueces de Brasil mediante activación química con $ZnCl_2$ y pirólisis. Los grupos funcionales ácidos y básicos en la superficie del carbón, junto con su elevada área específica (hasta $1640 \text{ m}^2/\text{g}$), favorecen interacciones físicas como las fuerzas de Van der Waals y el llenado microporoso, facilitando la remoción de paracetamol en medios acuosos.	(Lima et al., 2019)
Químico	Oxidación avanzada (degradación sonoquímica complementada con procesos sono-Fenton, sono-photo-Fenton y sono-photo-Fenton/ácido oxálico)	Carbamazepina, venlafaxina, metronidazol, clindamicina.	El tratamiento de oxidación avanzada usa ultrasonidos de alta frecuencia para generar radicales hidroxilos mediante cavitación acústica, que degradan contaminantes emergentes por oxidación y pirólisis. La liberación de compuestos adsorbidos en sólidos mejora su disponibilidad para ser atacados. La adición de hierro, luz UVA y ácido oxálico incrementa la producción de radicales, evitando la precipitación de Fe (III) y potenciando el proceso. Esto facilita la eliminación eficiente de contaminantes hidrofóbicos y concentrados en aguas residuales reales.	(Serna-Galvis et al., 2019)
Químico y Biológico	Oxidación Avanzada (foto-electro-Fenton) combinado con un sistema biológico (PEF-BP).	Valsartán	Este tratamiento combina la oxidación química del PEF, que transforma compuestos recalcitrantes en intermedios biodegradables, con un sistema biológico aeróbico que mineraliza completamente los subproductos en agua y dióxido de carbono. Es una solución innovadora para eliminar contaminantes emergentes como el valsartán.	(Martínez-Pachón et al., 2018)
Químico y biológico	Adsorción con carbones activados impregnados con enzima <i>Lacasa</i>	Carbamazepina	El tratamiento combina carbones activados preparados a partir de cáscaras de anacardo con la enzima Lacasa, que se inmoviliza bajo condiciones controladas de pH y temperatura. Durante el proceso, los fármacos (diclofenaco, carbamazepina y amoxicilina) se adsorben en la superficie porosa del carbón activado y se degradan enzimáticamente, transformándose en compuestos menos tóxicos	(Guerrero-Fajardo et al., 2025)

Los tratamientos identificados en los artículos seleccionados se dividieron en tres grupos, donde primero se destaca el uso de los procesos químicos avanzados de oxidación, como la electrooxidación en reactores electrolíticos 3D, la fotocatalisis heterogénea y diversos enfoques basados en oxidación avanzada, incluyendo variantes como foto-electro-Fenton y sonoquímica. En segundo lugar, se agrupan las tecnologías de adsorción con materiales innovadores, como bioadsorbentes basados en quitosano y óxidos de grafeno; también se resaltan los adsorbentes a base de fósforo y carbón, que han demostrado alta eficiencia en la eliminación de estos contaminantes. Por último, los enfoques combinados del tipo químico-biológicos, como sistemas híbridos que integran oxidación avanzada con procesos biológicos, y tratamientos fisicoquímicos, como la cavitación hidrodinámica intensificada con radiación UV y ozono, resaltan por su capacidad de adaptación a matrices complejas y a necesidades específicas.

Estas tecnologías representan soluciones prometedoras y sostenibles para mitigar los efectos adversos de los contaminantes farmacéuticos en los ecosistemas acuáticos, posicionándose como herramientas clave para la protección ambiental y la gestión integral de recursos hídricos (Sundararaman et al., 2022). En la Tabla 7, se agrupan y se comparan los porcentajes de eficiencia en la eliminación o remoción del contaminante farmacéutico por cada autor, aplicados a tratamientos basados en la oxidación y a tratamientos combinados de tipo químico-biológicos.

Tabla 7.

Reporte de la eficiencia de eliminación de tratamientos avanzados para la degradación de CEs de origen farmacéutico.

Tratamiento	Fármaco estudiado	Eficiencia de eliminación	Autores
Electro oxidación Avanzada en Reactor Electrolítico 3D.	Diclofenaco	98 %	(Acuña-Bedoya et al., 2022)

Tratamiento	Fármaco estudiado	Eficiencia de eliminación	Autores
Oxidación Avanzada (proceso solar foto-electro-Fenton (SPEF))	Sulfametoxazol	90 %	(Murillo-Sierra et al., 2018)
Fotocatálisis heterogénea y la oxidación fotosensibilizada	Diclofenaco	99 %	(Díaz-Angulo et al., 2019)
Remediación con hierro cero valente (Fe ⁰)	Diclofenaco e ibuprofeno	99.98 %	(Vieira et al., 2021)
Oxidación avanzada (foto-Fenton)	Carbamazepina	96.40 %	(Parra-Enciso et al., 2023)
Absorción por humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (CWHSF)	Metilparabeno	90 %	(Delgado et al., 2020)
Oxidación avanzada (AOP)	Azitromicina	40 %	(Cano et al., 2020)
Cavitación hidrodinámica (HC) con procesos de oxidación avanzada (AOPs)	Cefalexina	24.16 %	(Devia-Orjuela, Agudelo-Carrascal, et al., 2024)
Oxidación Avanzada (foto-electro-Fenton) combinado con un sistema biológico (PEF-BP).	Valsartán	97 %	(Martínez-Pachón et al., 2018)
cavitación hidrodinámica intensificada con radiación UV y ozono (HC+UV+O ₃)	Carbamazepina	22.03 %	(Devia-Orjuela, Castillo Córdoba, et al., 2024)
Degradación biológica mediada por microalgas	17 α -etinilestradiol (EE2)	90 %	(Pazmino-Sosa et al., 2024)
Oxidación avanzada (degradación sonoquímica complementada con procesos sono-Fenton, sono-photo-Fenton y sono-photo-Fenton/ácido oxálico)	Carbamazepina, venlafaxina, metronidazol, clindamicina.	100 %	(Serna-Galvis et al., 2019)
Adsorción con bioadsorbentes basados en quitosano y óxidos de grafeno	Ketorolaco trometamina	33.987 mg/g	(Giraldo et al., 2025)
Adsorción con adsorbente a base de fósforo y carbono (PCA)	Carbamazepina	21.56 mg/g	(Dhaouadi et al., 2024)
Adsorción con carbón activado	Paracetamol (acetaminofén)	411 mg/g	(Lima et al., 2019)

Tratamiento	Fármaco estudiado	Eficiencia de eliminación	Autores
Adsorción con carbones activados impregnados con enzima <i>lacasa</i>	Carbamazepina	344.3 mg/g	(Guerrero-Fajardo et al., 2025)

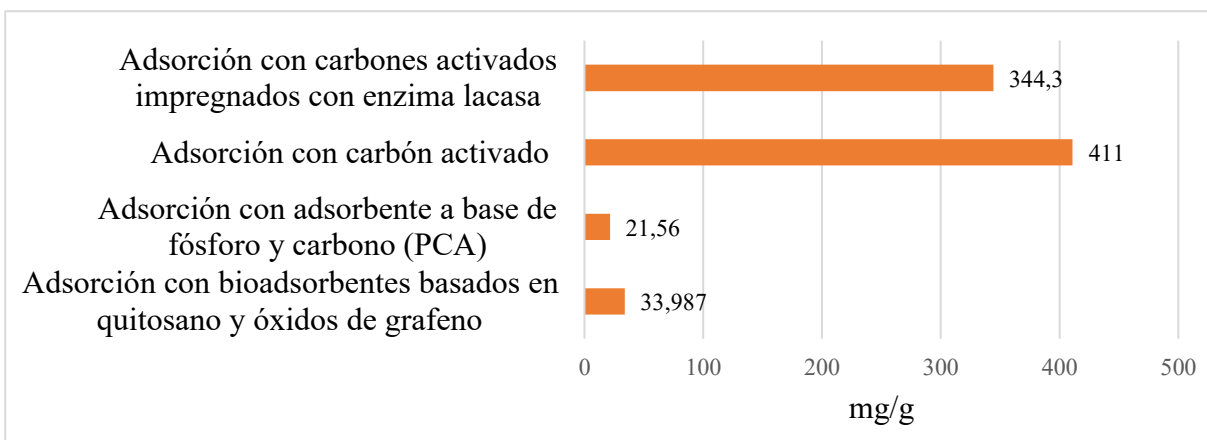
El desarrollo de las tecnologías para el tratamiento de agua confirma que la adsorción es una alternativa eficiente, práctica, económica, ecológica y con un impacto ambiental positivo, además de superar en efectividad a otras opciones disponibles actualmente (Letsoalo et al., 2023).

En la Figura 9, se comparan las capacidades máximas de absorción de los diferentes materiales utilizados para la eliminación de fármacos tales como: carbamazepina, paracetamol y ketorolaco trometamina.

La adsorción con carbón activado impregnados con la enzima *Lacasa*, así como el uso de adsorbentes a base de fósforo y carbono (PCA), resultan favorables para la degradación de la carbamazepina. Mientras que, el proceso empleando carbón activado como adsorbente muestra una mayor interacción con el paracetamol, utilizado como adsorbato, lo que permite una remoción efectiva de este fármaco.

Figura 9.

Tratamientos de adsorción y capacidades máximas de adsorción



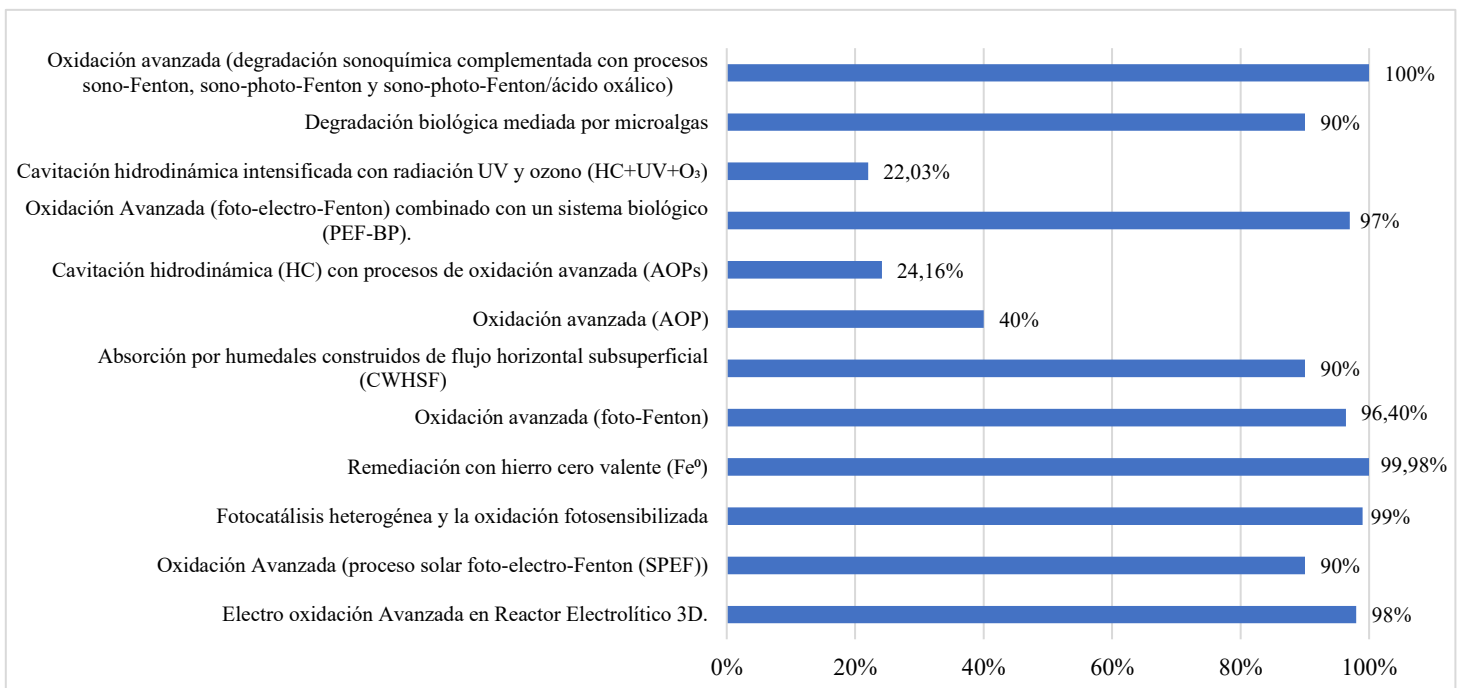
En el análisis comparativo de los tratamientos basados en adsorción revela que el carbón

activado es el adsorbente más eficiente, destacando por su elevada capacidad de remoción de contaminantes. Aunque, los carbones activados impregnados con enzima *Lacasa* mejoran la adsorción, su eficacia resulta ligeramente inferior en comparación con el carbón activado puro. Por otro lado, los bioadsorbentes basados en quitosano y óxidos de grafeno, pese a tener una capacidad de adsorción más baja, ofrecen ventajas significativas en términos de sostenibilidad y biodegradabilidad (Giraldo et al., 2025).

Las técnicas basadas en oxidación avanzada, que se observan en la Figura 10, sobresalen como las más efectivas en la eliminación de contaminantes farmacéuticos, consolidándose como una de las estrategias más recurrentes en los artículos analizados. Con eficiencias superiores al 90 %, estas metodologías representan soluciones altamente prometedoras para enfrentar los desafíos en el tratamiento de aguas residuales.

Figura 10.

Eficiencias de eliminación por diferentes tratamientos avanzados



Entre las tecnologías más destacadas se encuentran la degradación sonoquímica

complementada con procesos sonoquímicos, el proceso foto-electro-Fenton (PEF-BP), el proceso solar foto-electro-Fenton (SPEF), la foto-Fenton y electro oxidación avanzada en un reactor electrolítico 3D. Estas técnicas no solo se distinguen por su elevada capacidad para degradar contaminantes, sino también por su potencial para mineralizar compuestos presentes, transformándolos en sustancias inocuas como dióxido de carbono y agua (Martínez-Pachón et al., 2018). Esto las convierte en herramientas clave no solo para la eliminación de contaminantes, sino también para una remediación integral y sostenible. Su alta recurrencia en los estudios revisados evidencia la confianza de la comunidad científica en su efectividad y resalta su relevancia como eje central en el desarrollo de estrategias avanzadas de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, los métodos basados en cavitación hidrodinámica, aunque son opciones interesantes, presentan eficiencias más bajas, en un rango entre 22.03 % y el 24.16 %, lo que indica la necesidad de optimizaciones tecnológicas para incrementar su desempeño. Estas bajas eficiencias podrían atribuirse a factores limitantes en la dinámica del proceso, como la intensidad de la cavitación o la interacción limitada con los contaminantes más recalcitrantes (Devia-Orjuela, Agudelo-Carrascal, et al., 2024).

La degradación biológica mediada por microalgas demuestra una eficiencia destacable del 90 % en la remoción de contaminantes emergentes, aprovechando la capacidad de las microalgas para metabolizar compuestos orgánicos en condiciones sostenibles y de bajo costo (Pazmino-Sosa et al., 2024). Este método es especialmente apropiado para aguas residuales con alta carga orgánica y puede potenciarse mediante su integración con otros enfoques. Por su parte, la absorción en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (CWHSF) también logra eficiencias del 90 %, siendo una opción ecológica y económica que combina la acción de plantas y sustratos para retener y degradar contaminantes (Delgado et al., 2020). Este tratamiento es idóneo para regiones

rurales y permite una gestión más sostenible de los recursos hídricos. En cuanto a la remediación con hierro cero valente (Fe^0), su eficiencia alcanza el 99.98 %, convirtiéndose en una solución excepcional para abordar contaminantes persistentes mediante reacciones químicas de transformación (Vieira et al., 2021). Finalmente, la fotocatalisis heterogénea y la oxidación fotosensibilizada, con eficiencias de hasta el 99 %, destacan como alternativas prometedoras que utilizan catalizadores activados por luz para descomponer contaminantes recalcitrantes (Díaz-Angulo et al., 2019). Estos métodos ofrecen resultados sobresalientes y pueden integrarse con tecnologías avanzadas para optimizar el tratamiento de aguas residuales.

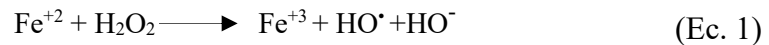
4.5 Sistema propuesto para la remoción de CE farmacológicos en Colombia

Con base a los autores seleccionados en la investigación, y las eficiencias de eliminación reportadas, se propone la implementación de un tipo de tratamiento químico o químico-biológico basado en los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) como una tecnología alternativa para su aplicación en una PTAR. Este tipo de tecnología permitirá disminuir el riesgo de contaminación en las diferentes matrices acuáticas con presencia de los fármacos priorizados en Colombia, como se mencionó en la Figura 7. Los POAs, han mostrado ser la tecnología adecuada para la degradación de estos contaminantes a escala laboratorio y piloto (Botero-Coy et al., 2018).

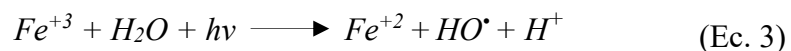
Las estaciones depuradoras de aguas residuales, tanto primarias como secundarias, presentan limitaciones en la eliminación de estos contaminantes, facilitando su introducción en los sistemas de agua potable.

En particular, el foto-Fenton ha sido seleccionado como tecnología óptima para este estudio debido a la sólida evidencia recopilada en la revisión bibliográfica, que confirma su alta eficiencia en la eliminación de diversos fármacos. Gracias a la combinación de sales de hierro, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radiación UV o solar, este proceso permite la generación de radicales

hidroxilos (OH^\bullet) altamente reactivos debido a la regeneración de iones férricos (Fe^{3+}) a iones ferrosos (Fe^{2+}), promoviendo la degradación efectiva de contaminantes farmacéuticos persistentes (Parra-Enciso et al., 2023). Además de formarse radicales OH^\bullet , se generan radicales per-hidroxilo (HO_2^\bullet), los cuales inician una reacción de oxidación en cadena para eliminar la materia oxidable. Sin embargo, los radicales HO_2^\bullet presentan menor poder de oxidación que los OH^\bullet (Rubio-Clemente et al., 2014). Esta reacción se muestra en la Ecuación 1 y 2.



El hierro puede ser añadido en su forma ferrosa (Fe^{+2}) o férrica (Fe^{+3}), siendo ésta última conocida como proceso tipo Fenton. Las sales de hierro férricas suelen ser menos utilizadas debido a la lenta generación de radicales OH^\bullet en las fases iniciales del proceso. Sin embargo, cuando se combina con radiación ultravioleta (UV) o solar, en cuyo caso recibe el nombre de proceso foto-Fenton UV y foto-Fenton solar, respectivamente, su eficiencia aumenta significativamente ya que se favorece la regeneración del Fe^{+2} y aumenta, al mismo tiempo, el número de radicales OH^\bullet generados. Este proceso sólo ocurre en un rango de pH ácido de 2.8 -3.0 de complejos acuosos de Fe^{+3} ($\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$), los cuales son capaces de absorber radiación UV y visible sufriendo foto-reducción y produciendo OH^\bullet (Rubio-Clemente et al., 2014). Como se muestra en la Ecuación 3.



En valores de pH cercanos al neutro (los típicos en las estaciones de tratamiento de aguas residuales), la eficiencia del proceso Fenton disminuye, lo que es una desventaja para la implementación del sistema a escalas mayores. El proceso foto-Fenton puede mejorarse en presencia de un ácido orgánico como el ácido oxálico, ácido cítrico o ácido tartárico. Así, la acidificación del medio a pH 2.8–3.0 no es necesaria ya que se forman complejos de ácido

orgánico-hierro, manteniendo los iones de hierro en la solución (Martínez-Pachón et al., 2022).

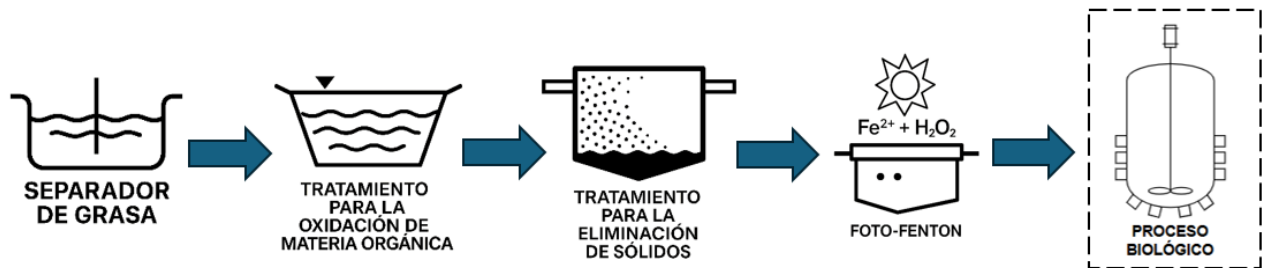
La implementación del foto-Fenton en plantas de tratamiento de aguas residuales de Colombia permitirá optimizar la eliminación de estos contaminantes, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y garantizando un tratamiento de aguas residuales más eficiente y sostenible.

El proceso foto-Fenton es una tecnología altamente eficiente para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales. En un estudio realizado por Parra-Enciso et al. (2023), se logró una reducción del 96,4 % de carbamazepina en solo 30 minutos mediante irradiación solar simulada y condiciones optimizadas de pH y concentración de reactivos. Aunque la mineralización fue limitada a menos del 25 %, el proceso sigue siendo efectivo en la degradación de los contaminantes. Cano et al. (2020) demostraron que foto-Fenton elimina casi por completo la azitromicina, con una reducción superior al 40 % del carbono orgánico total, lo que confirma su capacidad para descomponer compuestos farmacológicos complejos. Buitrago-González et al. (2024) también reportaron eficiencias de eliminación entre el 80 % y más del 95 %, dependiendo de la concentración de peróxido de hidrógeno y el tipo de contaminante tratado. Estos hallazgos validan que el proceso foto-Fenton es una alternativa eficaz para el tratamiento de aguas residuales, con capacidad comprobada para eliminar contaminantes farmacéuticos y mejorar la calidad del agua. En la Figura 11, se observa el esquema propuesto para implementarse en una PTAR para la depuración de CEs utilizando el proceso foto-Fenton después de un tratamiento primario y secundario convencional. Martínez-Pachón et al., (2022) propone una alternativa para el proceso electroquímico de oxidación avanzada adicionando ácido oxálico para reducir el consumo de energía y eliminar el fármaco presente en aguas residuales además de un sistema biológico como un tratamiento previo y/o posterior. La combinación del paso biológico después del sistema

electroquímico también podría eliminar el ácido oxálico añadido, que es un producto biodegradable que se elimina fácilmente mediante un proceso biológico. En este enfoque, ayuda a la optimización de las principales variables en el sistema POA para reducir el tiempo y costo del paso electroquímico.

Figura 11.

Esquema de un sistema de tratamiento de aguas residuales con foto-Fenton



Nota. Adaptado de María Eugenia Buitrago-González et al. (2024)

La mayor degradación de compuesto farmacológicos se logra al utilizar el POA con adición de ácido oxálico y esto se debe a la disponibilidad de iones de hierro solubles al formar complejos de Fe^{+3} oxalato a pH cercanos a la neutralidad. Esto permite que la reacción de Fenton genere radicales $HO\bullet$ adicionales. Este sistema, redujo en más de diez veces el peligro ambiental de los efluentes como tratamiento terciario para eliminar contaminantes emergentes y reducir su riesgo en los efluentes de la PTAR (Martínez-Pachón et al., 2022).

Martínez et al (2018) también propone un sistema de acoplamiento del proceso Fenton con tratamientos biológicos para la degradación de fármacos presentes en aguas residuales. Mediante un análisis económico realizado en una planta farmacéutica ubicada en Madrid, España, comparó el sistema combinado con la implementación del proceso Fenton de forma individual que dicha fabrica usa para tratar las aguas residuales. Obtuvo una reducción del costo unitario por unidad volumétrica de aguas residuales tratadas (36 %) para la combinación de oxidación de Fenton y tratamiento biológico en comparación con la oxidación de Fenton como tratamiento único

intensivo, logrando en ambas estrategias rendimientos de degradación superiores al 90 %.

El acoplamiento del proceso de oxidación de Fenton con un Reactor Biológico Secuencial por lotes (SBR) resulta económicamente atractivo. En este sistema combinado, se requiere una dosis de oxidante moderada, alrededor del 65 % menor que el consumido en el proceso Fenton sin sistema biológico. Cuando el proceso de Fenton se emplea como tratamiento único, es necesario un exceso de oxidante para lograr una mineralización casi completa de la materia orgánica. Este tipo de reactores biológico secuencial por lotes (SBR) se propuso como sistemas biológicos finales debido a la capacidad simple, flexible y notable de amortiguar las fluctuaciones de composición de los efluentes de entrada sin afectar la operación del reactor. El tratamiento biológico solo representa el 11% de los costos totales de operación (Martínez et al., 2018).

El Foto-Fenton es una opción viable para el tratamiento de grandes volúmenes de agua, con resultados altamente efectivos en la eliminación de contaminantes. Según Buitrago-González et al. (2024), el costo estimado del proceso es de 84,267 COP/m³, lo que lo posiciona como una alternativa de alto impacto en la descontaminación de efluentes. Aunque su implementación a gran escala requiere cantidades significativas de sales de hierro y peróxido de hidrógeno, se han desarrollado estrategias para optimizar su consumo y minimizar los costos operativos. La optimización del diseño de reactores y la integración de mejoras en el proceso permitirá reducir los costos sin comprometer la eficiencia del tratamiento. En el contexto colombiano, Foto-Fenton aprovecha la radiación solar y puede integrarse en sistemas de tratamiento de aguas residuales, garantizando una solución efectiva y sostenible para la eliminación de contaminantes emergentes.

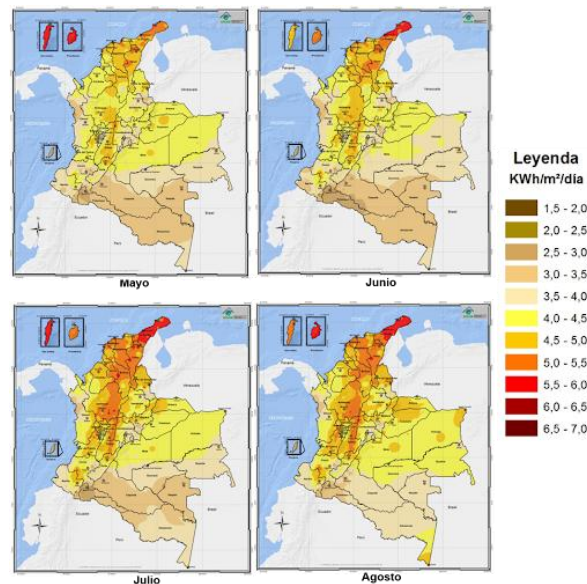
El proceso Foto-Fenton puede aprovechar la radiación solar como fuente de luz para potenciar la generación de radicales hidroxilos (-OH), los cuales son los agentes responsables de la degradación de contaminantes en el agua. Sin embargo, no es un requisito exclusivo, ya que

también puede utilizarse radiación ultravioleta artificial (UV-A) para activar el mecanismo de reacción, lo que permite su aplicación en entornos donde la luz solar no es constante o suficiente.

Los niveles de radiación global acumulada en el país pueden oscilar entre 500 y 8.500 Wh/m² al día, con un promedio mensual que varía entre 2.000 y 7.500 Wh/m² al día (IDEAM, 2025), dependiendo de factores como la latitud, la elevación y la orografía. En la Figura 12, se observa la distribución de la irradiación recibida sobre la superficie del territorio colombiano en el periodo del año 2017. Se destaca un comportamiento favorable en tres regiones del país, región Andina, Caribe y Orinoquía.

Figura 12.

Mapa de la irradiación solar en Colombia.



Nota. Tomado de (IDEAM, 2017)

En ese sentido, para el contexto colombiano, donde la radiación solar es abundante durante todo el año, el foto-Fenton se convierte en una opción sostenible, proporcionando un aprovechamiento óptimo de la energía renovable disponible en el país. Esto contribuye a disminuir la dependencia de energía externa y a reducir los costos energéticos asociados a la aplicación del proceso en una PTAR, en particular en las regiones con altos niveles de irradiación solar donde la

activación de la reacción foto-Fenton sería más eficiente.

La implementación de este proceso en sistemas de tratamiento de aguas residuales puede optimizarse dependiendo de la disponibilidad de fuentes de luz naturales o artificiales, asegurando su funcionamiento en distintas condiciones operativas. En regiones con mayor exposición solar, el foto-Fenton puede operar con mayor eficiencia energética. Esto refuerza la viabilidad del foto-Fenton como una tecnología adaptable y efectiva para la descontaminación de aguas residuales en Colombia.

Para garantizar su viabilidad en el contexto colombiano, es fundamental llevar a cabo estudios piloto en diversas PTAR en donde se analice su rendimiento y evaluar el costo - beneficio en condiciones reales para que se establezcan estrategias para maximizar su eficiencia. La evaluación del costo-beneficio permitirá definir parámetros operativos óptimos y promover su integración como una solución innovadora y sostenible para la descontaminación de efluentes.

4.5.3 Desafíos y análisis TRL

Para el análisis de niveles de madurez tecnológica Technology Readiness Levels (TRL), se seleccionaron aquellas tecnologías que, de acuerdo con la evidencia presentada en la revisión bibliográfica, han demostrado eficiencias superiores al 90 % en la remoción del contaminante objetivo. A partir de esta selección, se realizó una evaluación del estado de desarrollo de cada técnica mediante el marco TRL (ver Apéndice B), con el propósito de identificar sus principales limitaciones operativas y determinar su viabilidad en condiciones reales de aplicación. Esta clasificación se puede evidenciar en la Tabla 8.

Tabla 8.*Niveles TRL de diferentes tratamientos para la remoción de CEs de origen farmacéutico*

Tipo de tratamiento	Nivel TRL
Oxidación Avanzada (foto-electro-Fenton) combinado con un sistema biológico (PEF-BP).	4
Oxidación avanzada (foto-Fenton)	3
Remediación con hierro cero Valente (Fe ⁰)	4
Fotocatálisis heterogénea y la oxidación foto sensibilizada	3
Adsorción con carbón activado	4

El tratamiento PEF-BP enfrenta desafíos operativos que restringen su escalabilidad. La eficiencia del proceso depende de variables críticas como el tipo de electrolito, el pH y la densidad de corriente aplicada, las cuales influyen directamente en la generación de especies oxidantes responsables de la degradación del contaminante. En condiciones de pH cercanas a la neutralidad, disminuye la reactividad del sistema y se favorece la precipitación de hierro. Además, se forman subproductos intermedios resistentes que dificultan la mineralización completa del contaminante. Por otra parte, el proceso presenta una demanda energética lo que puede limitar su viabilidad económica. Existe el riesgo de formación de compuestos clorados tóxicos por el uso de NaCl como electrolito, lo que exige un control preciso para prevenir impactos ambientales (Martínez-Pachón et al., 2018). Esta tecnología ha sido desarrollada y probada a escala de laboratorio, principalmente con efluentes sintéticos, lo que evidencia su efectividad controlada pero también subraya la necesidad de validación en condiciones reales.

El tratamiento foto-Fenton presenta limitaciones operativas que condicionan su eficacia fuera de ambientes controlados. La eficiencia del proceso depende de un equilibrio óptimo entre la concentración de reactivos como H₂O₂ y Fe²⁺, pues concentraciones excesivas pueden generar efectos inhibitorios como el barrido de radicales hidroxilos o la precipitación de hierro, reduciendo

la capacidad oxidativa del sistema. Además, en matrices acuosas reales, la presencia de iones inorgánicos y compuestos húmicos interfiere en la generación de radicales o afecta la absorción de radiación UV, impidiendo una degradación efectiva del contaminante (Parra-Enciso et al., 2023). Esta sensibilidad operativa exige una optimización rigurosa de las condiciones físicas y químicas para mantener una eficiencia constante en escenarios de aplicación práctica.

La remediación catalítica con hierro cero Valente (Fe^0), asistida por radiación microondas, exige una configuración experimental rigurosa, parámetros como la dosis de Fe^0 y la potencia de irradiación deben mantenerse dentro rangos específicos para evitar pérdidas en eficiencia. Las partículas de Fe^0 sintetizadas muestran baja área superficial y una distribución irregular de poros, lo que restringe el contacto entre el contaminante y los sitios activos. Además, el sistema depende exclusivamente de la acción catalítica, lo que implica que cualquier desviación química o térmica puede comprometer el desempeño del tratamiento. En matrices con elevada carga orgánica y múltiples fármacos, se presenta competencia por los radicales generados, lo que puede desviar las rutas de reacción y afectar la cinética global del proceso. También el sistema exige regeneración periódica del catalizador (Vieira et al., 2021).

El tratamiento mediante fotocatalisis heterogénea acoplada con oxidación, la eficiencia del sistema depende de una interacción controlada entre el fotosensibilizador y el catalizador semiconductor, ya que su acoplamiento puede modificar propiedades críticas como la banda prohibida, la absorbancia espectral y la estabilidad estructural del material. Durante la irradiación, el sensibilizador puede sufrir desorción o degradación, lo que interrumpe la continuidad del proceso y reduce la disponibilidad de sitios activos. Además, la coexistencia de múltiples especies oxidantes como radicales superóxido, hidroxilo y oxígeno singlete introduce complejidad en las rutas de reacción, por lo que se requiere un manejo cuidadoso para evitar interferencias o

trayectorias poco eficientes. En paralelo, la presencia de subproductos inorgánicos como nitratos y cloruros compite con el catalizador por la absorción de luz, disminuyendo su activación fotónica. (Díaz-Angulo et al., 2019).

Uno de los desafíos que presenta el proceso de adsorción con carbón activado, se debe a las propiedades texturales y químicas del adsorbente, las cuales varían según la proporción del agente activante y las condiciones de síntesis. Pequeñas variaciones en la estructura porosa, el área superficial o la distribución de grupos funcionales pueden alterar significativamente su rendimiento. En matrices acuosas complejas, como efluentes hospitalarios, la competencia entre múltiples contaminantes por los sitios activos puede reducir la selectividad y la reproducibilidad del proceso. Aunque la técnica presenta cinética rápida y alta capacidad de adsorción, estos atributos pueden generar problemas operativos en sistemas continuos debido a una saturación acelerada (Lima et al., 2019).

Actualmente, los procesos foto Fenton se encuentran en fase de desarrollo experimental y madurez tecnológica encaminadas a pruebas y validaciones a escala piloto, aunque no se ha encontrado suficiente información de la puesta en marcha de un prototipo funcional del proceso foto Fenton para la eliminación de CE de origen farmacéutico específicamente; se han realizado pruebas a nivel laboratorio donde se han tomado muestras de aguas residuales de los efluentes de las PTAR demostrando resultados prometedores que respaldan su avance tecnológico y estudios posteriores. El proceso foto Fenton se destaca como la alternativa con mayor posibilidad de acoplamiento a una PTAR por las eficiencias de remoción y la posibilidad de integrarse con otros tratamientos.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se logró identificar los contaminantes farmacológicos emergentes presentes en recursos hídricos, los métodos de cuantificación y tratamientos para su eliminación en Colombia, mediante una revisión sistemática de la literatura utilizando la metodología PRISMA. Este enfoque permitió identificar inicialmente 948 documentos, después del proceso de selección y cribado, se obtuvieron 43 trabajos de investigación que cumplieron los criterios establecidos. Además, entre las bases de datos consultadas, *Science Direct* se destacó como la fuente principal de información, ocupando el 51.16 % de la distribución de los documentos seleccionados.

A partir de los artículos seleccionados, se identificaron 42 fármacos presentes en cuerpos de agua en Colombia, lo que indica que en al menos 10 departamentos del país se realizaron estudios y muestreos para la detección de estos compuestos emergentes. De los fármacos cuantificados e identificados, se evidenciaron con mayor nivel de riesgo el Diclofenaco y el Ibuprofeno (analgésicos), con una ocurrencia reportada del 57 % y 50 %, y concentraciones promedio del 5,50 $\mu\text{g/L}$ y 21,34 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. La Carbamazepina (anticonvulsivo) también se identificó con un 57 % de ocurrencia y concentración promedio de 1,72 $\mu\text{g/L}$. Entre las ciudades más destacadas por la frecuencia de reportes se encuentran Barranquilla, Bogotá, Bucaramanga, Medellín, así como los ríos Magdalena, y Cauca, que actúan como receptores de múltiples fuentes de contaminación.

En cuanto a la Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC) y la Espectrofotometría UV-visible, fueron las técnicas más empleadas debido a su accesibilidad, bajo costo y facilidad de operación. Mientras que, en estudios donde se requiera más precisión y selectividad en la cuantificación, es necesario utilizar técnicas híbridas como la Cromatografía Líquida acoplada a

espectrometría de masas (UPLC- MS/MS), que permite una detección más precisa en matrices complejas con presencia de contaminantes emergentes en bajas concentraciones.

De los hallazgos encontrados, el proceso de oxidación avanzada del tipo foto-Fenton demostró ser una técnica con una eficiencia de remoción superior al 90 %, consolidándose en una alternativa altamente eficiente para el tratamiento de aguas residuales en Colombia, destacando su capacidad para eliminar contaminantes farmacéuticos y su compatibilidad con las condiciones climáticas del país. La elevada disponibilidad de radiación solar especialmente en regiones como Andina y Caribe permite optimizar su aplicación, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales y mejorando su sostenibilidad operativa.

Finalmente, esta revisión sistemática se constituye como base inicial para futuras investigaciones enfocadas en la identificación y mitigación de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en cuerpos de agua en Colombia. Se plantea la necesidad de construir un inventario de estos compuestos emergentes por departamento, para identificar los riesgos de salud y riesgos ambientales dentro de un contexto local. Esto le apostaría a una política de legislación o regulación sobre las concentraciones permitidas de estos contaminantes y así mismo, promover nuevas tecnologías de depuración en las plantas de tratamiento de aguas residuales o en fuentes primarias de contaminación como las aguas residuales hospitalarias.

6. Recomendaciones

Se recomienda explorar más a fondo sobre el proceso de Oxidación Avanzada tipo foto-Fenton acoplado a un proceso biológico para el tratamiento de aguas residuales con presencia de contaminantes emergentes de origen farmacéutico en Colombia. Sin embargo, su implementación a gran escala requiere una evaluación detallada de aspectos clave como la optimización de costos, el desarrollo de infraestructura adecuada y la gestión eficiente de los residuos generados. Desde un punto de vista económico y técnico, sería recomendable que la implementación piloto del proceso foto-Fenton iniciara en las Plantas de Tratamiento Aguas Residuales (PTAR) de clínicas y hospitales de nivel III y IV, ya que no se manejan flujos o volúmenes de agua tan elevados y son fuente puntual de descarga con concentraciones trazas de fármacos que, al llegar a las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) municipales, no se logran eliminar en su totalidad.

Referencias

- Acuña-Bedoya, J. D., Alvarez-Pugliese, C. E., Castilla-Acevedo, S. F., Bravo-Suárez, J. J., & Marriaga-Cabrales, N. (2022). Degradation of diclofenac aqueous solutions in a 3D electrolytic reactor using carbon-based materials as pseudo third electrodes in fluidized bed, anodic and cathodic configurations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(4), 108075. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108075>
- Agudelo, E. A. (2019). *Modelo cinético para la degradación de contaminantes emergentes (antibióticos) presentes en un agua residual, bajo un sistema de tratamiento secuencial vermifiltración –tecnologías de oxidación avanzada*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76818>
- Ahmadi, S., Quimbayo, J. M., Yaah, V. B. K., de Oliveira, S. B., & Ojala, S. (2025). A critical review on combining adsorption and photocatalysis in composite materials for pharmaceutical removal: Pros and cons, scalability, TRL, and sustainability. *Energy Nexus*, *17*, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100396>
- Berset, J.-D., Brenneisen, R., & Mathieu, C. (2010). Analysis of illicit and illicit drugs in waste, surface and lake water samples using large volume direct injection high performance liquid chromatography – Electrospray tandem mass spectrometry (HPLC–MS/MS). *Chemosphere*, *81*(7), 859-866. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.08.011>
- Blanco Gómez, D., Rubio, E., Marin, M., & Agustina, B. (2021). *Propuesta metodológica para revisión sistemática en el ámbito de la ingeniería basada en PRISMA*.
- Botero-Coy, A. M., Martínez-Pachón, D., Boix, C., Rincón, R. J., Castillo, N., Arias-Marín, L. P., Manrique-Losada, L., Torres-Palma, R., Moncayo-Lasso, A., & Hernández, F. (2018). ‘An

- investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewater'. *Science of The Total Environment*, 642, 842-853.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.088>
- Bustos Murillo, F. A., Pulido Aponte, Á. E., Rivera Escobar, H. M., Bustos Murillo, F. A., Pulido Aponte, Á. E., & Rivera Escobar, H. M. (2023). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: Usos y perspectivas. *Tecnura*, 27(76), 111-143.
<https://doi.org/10.14483/22487638.19390>
- Całus-Makowska, K., Grosser, A., & Grobelak, A. (2023). Pharmaceutical contamination in wastewater treatment plants: Occurrence, challenges in detection and insights on high-performance liquid chromatography as an effective analytical tool in environmental matrices — a review. *Desalination and Water Treatment*, 305, 129-154.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29789>
- Cano, P. A., Jaramillo-Baquero, M., Zúñiga-Benítez, H., Londoño, Y. A., & Peñuela, G. A. (2020). Use of simulated sunlight radiation and hydrogen peroxide in azithromycin removal from aqueous solutions: Optimization & mineralization analysis. *Emerging Contaminants*, 6, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.12.004>
- Cardoso, A., Maia Fraga, A. C., da Silva Araujo, M., de Matos, R., Teixeira Tarley, C. R., Ripke Ferreira, C. S., Santos, O. O., & Medeiros, R. A. (2025). Innovation in Venlafaxine Detection: Development and Application of Electroanalytical Method using a Boron-Doped Diamond Electrode and performance comparison with UHPLC-MS/MS. *Talanta*, 127988. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.127988>
- Carrillo, J. X. C. (2016). *ANÁLISIS Y DESTINO DE LOS NUEVOS CONTAMINANTES EMERGENTES EN EL AGUA*.

- Cerón-Vivas, A., & Peñuela Mesa, G. A. (2024). Environmental risk assessment of pharmaceutical pollutants in the Oro River Sub-basin (Colombia). *Environmental Research*, 252. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118951>
- Dávila, S. M., Gutiérrez, E. H., & Prior, F. J. C. (2017). *Es necesario conocer cómo el quehacer del hombre en distintos ámbitos contribuye a la degradación de la calidad del líquido*.
- Delgado Espinosa, N. Y. (2019). *Diagnóstico y remoción de contaminantes emergentes en aguas superficiales y cloacales* [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/73272>
- Delgado, N., Bermeo, L., Hoyos, D. A., Peñuela, G. A., Capparelli, A., Marino, D., Navarro, A., & Casas-Zapata, J. C. (2020). Occurrence and removal of pharmaceutical and personal care products using subsurface horizontal flow constructed wetlands. *Water Research*, 187, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116448>
- Devia-Orjuela, J. S., Agudelo-Carrascal, I. C., Gamba-Martínez, L. N., Garzón, L. S., Agudelo-Valencia, R. N., & Machuca-Martínez, F. (2024). A hydrodynamic cavitation prototype reactor evaluation for decreasing cephalixin concentration in aqueous solution. *Results in Engineering*, 22, 102257. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102257>
- Devia-Orjuela, J. S., Castillo Córdoba, V., Tere Heredia, T. G., Agudelo-Valencia, R. N., & Machuca-Martínez, F. (2024). Analysis of hydrodynamic cavitation intensified with ozone and UV radiation to decrease the concentration of carbamazepine in aqueous solution. *Results in Engineering*, 23, 102630. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102630>
- Dhaouadi, F., Aouaini, F., Basha, B., Bonilla-Petriciolet, A., Georgin, J., & Lamine, A. B. (2024). Evaluation and analysis of the adsorption mechanism of three emerging pharmaceutical pollutants on a phosphorised carbon-based adsorbent: Application of advanced analytical

- models to overcome the limitation of classical models. *Heliyon*, *10*(14).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34788>
- Diaz-Angulo, J., Porras, J., Mueses, M., Torres-Palma, R. A., Hernandez-Ramirez, A., & Machuca-Martinez, F. (2019). Coupling of heterogeneous photocatalysis and photosensitized oxidation for diclofenac degradation: Role of the oxidant species. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *383*, 112015.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112015>
- Elles-Pérez, C., Guzman-Tordecilla, M., Ramos, Y., Castillo-Ramírez, M., Moreno-Ríos, A., Garzón-Rodríguez, C., & Rojas-Solano, J. (2024). Assessment of water quality and emerging pollutants in two fish species from the mallorquin swamp in the Colombian Caribbean. *Heliyon*, *10*(20), e39005. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39005>
- Fabregat-Safont, D., Botero-Coy, A. M., Nieto-Juárez, J. I., Torres-Palma, R. A., & Hernández, F. (2023). Searching for pharmaceutically active products and metabolites in environmental waters of Peru by HRMS-based screening: Proposal for future monitoring and environmental risk assessment. *Chemosphere*, *337*, 139375.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139375>
- Flórez, J. A., Méndez, D. M., Núñez, S. M. B., Enamorado-Montes, G., & Negrete, J. M. (2021). Productos farmacéuticos y de cuidado personal presentes en aguas superficiales, de consumo humano y residuales en el departamento de Córdoba, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *12*(2), Article 2.
<https://doi.org/10.22490/21456453.4231>
- Florez, J. D. A., Mendez, D. S. M., Nuñez, S. M. B., Enamorado-Montes, G. H., & Negrete, J. L. M. (2021). Presencia de contaminantes emergentes (CE) en los distritos de riego del

- departamento de Córdoba, Colombia. *Orinoquia*, 25(1), 57-63.
<https://doi.org/10.22579/20112629.686>
- Fountain, K. J. (2011). *UPLC versus UHPLC: Comparison of Loading and Peak Capacity for Small Molecule Drugs*.
- Gallego-Ríos, S. E., Atencio-García, V. J., & Peñuela, G. A. (2021). Effect of ibuprofen in vivo and in vitro on the sperm quality of the striped catfish *Pseudoplatystoma magdaleniatum*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), 36133-36141.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13245-6>
- Gallego-Ríos, S. E., & Peñuela, G. A. (2021). Evaluation of ibuprofen and diclofenac in the main rivers of Colombia and striped catfish *Pseudoplatystoma magdaleniatum*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 210. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08922-5>
- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7(2), 52-73.
- Giraldo, L., Fajardo, C. A. G., & Piraján, J. C. M. (2025). Innovative chitosan/graphene oxide composites: A thermodynamic and calorimetric approach to pharmaceutical waste removal from water. *Results in Engineering*, 25, 103697.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103697>
- Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. A. (2014). *Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización*. *Dyna*, 81(184), 158-163.

- González Canal, Í., Muga Relloso, I., Rodríguez Medina, J., & Blanco Miguel, M. (2018). Contaminantes emergentes en aguas residuales urbanas y efluentes hospitalarios. Caracterización, rendimientos de eliminación en EDAR y estimación de la incidencia del vertido hospitalario en la EDAR de Galindo. *Tecnoaqua*, 29, 42-54.
- Guerrero-Fajardo, C. A., Giraldo, L., & Moreno-Pirajan, J. C. (2025). Efficient removal of pharmaceutical contaminants using laccase immobilized on activated coal derived from cashew nut shells: Thermodynamic, kinetic and calorimetry study. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 43, 101868. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101868>
- Hernández, F., Ibáñez, M., Botero-Coy, A.-M., Bade, R., Bustos-López, M. C., Rincón, J., Moncayo, A., & Bijlsma, L. (2015). LC-QTOF MS screening of more than 1,000 licit and illicit drugs and their metabolites in wastewater and surface waters from the area of Bogotá, Colombia. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 407(21), 6405-6416. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8796-x>
- Hernández, F., Ibáñez, M., Portoles, T., Hidalgo-Troya, A., Ramírez, J. D., Paredes, M. A., Hidalgo, A. F., García, A. M., & Galeano, L. A. (2024). High resolution mass spectrometry-based screening for the comprehensive investigation of organic micropollutants in surface water and wastewater from Pasto city, Colombian Andean highlands. *Science of The Total Environment*, 922, 171293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171293>
- Hlengwa, N. B., & Mahlambi, P. N. (2020). Ultrasonic Followed by Solid Phase Extraction and Liquid Chromatography-Photodiode Array for Determination of Pharmaceutical Compounds in Sediment and Soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104(4), 464-470. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02829-6>

- IDEAM, I. de H., Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA*. Imprenta Nacional de Colombia.
<https://www.andi.com.co/uploads/radiacion.compressed.pdf>
- IDEAM, I. de H., Meteorología y Estudios Ambientales. (2025). *Promedio mensual de la radiación global acumulada diaria recibida en superficie (Hoja metodológica versión 1.2). República de Colombia*.
https://bart.ideam.gov.co/indiecosistemas/ind/clima/hm/HM_radiacion_global_acumulada.pdf
- Jaimes Arias, L. C. (2020). *Presencia de contaminantes emergentes en fuentes hídricasy tratamientos potenciales para su eliminación*. <http://hdl.handle.net/10654/36205>
- Jaimes Urbina, J. A., & Vera Solano, J. A. (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. *Informador técnico*, 84(2 (Julio-Diciembre)), 249-263.
- Letsoalo, M. R., Sithole, T., Mufamadi, S., Mazhandu, Z., Sillanpaa, M., Kaushik, A., & Mashifana, T. (2023). Efficient detection and treatment of pharmaceutical contaminants to produce clean water for better health and environmental. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135798>
- Lima, D. R., Hosseini-Bandegharai, A., Thue, P. S., Lima, E. C., de Albuquerque, Y. R. T., & Reis, G. S., Umpierres, C. S., Dias, S. L. P., & Tran, H. N. (2019). Efficient acetaminophen removal from water and hospital effluents treatment by activated carbons derived from Brazil nutshells. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 583, 123966. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123966>

- Lodeiro, P., Achterberg, E. P., & El-Shahawi, M. S. (2017). Detection of silver nanoparticles in seawater at ppb levels using UV–visible spectrophotometry with long path cells. *Talanta*, *164*, 257-260. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.11.055>
- María Eugenia Buitrago-González, J. D. S.-P., María José Virviescas-Ospina, S. S.-L., María Eugenia Buitrago-González, J. D. S.-P., & María José Virviescas-Ospina, S. S.-L. (2024). Emerging Pharmaceutical Pollutants in Colombian Watersheds and Environmental Management Measures. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, *51*(10), Article 10. <https://jonuns.com/index.php/journal/article/view/1660>
- Martínez, F., Molina, R., Rodríguez, I., Pariente, M. I., Segura, Y., & Melero, J. A. (2018). Techno-economical assessment of coupling Fenton/biological processes for the treatment of a pharmaceutical wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(1), 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.008>
- Martínez-Pachón, D., Botero-Coy, A. M., Hernández, F., León López, N., Torres-Palma, R. A., & Moncayo-Lasso, A. (2022). Elimination of contaminants of emerging concern and their environmental risk in world-real municipal wastewaters by electrochemical advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3). Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107803>
- Martínez-Pachón, D., Ibáñez, M., Hernández, F., Torres-Palma, R. A., & Moncayo-Lasso, A. (2018). Photo-electro-Fenton process applied to the degradation of valsartan: Effect of parameters, identification of degradation routes and mineralization in combination with a biological system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(6), 7302-7311. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.015>

- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Liu, G., Balaram, V., Ribeiro, A. R. L., Lu, Z., Stock, F., Carmona, E., Teixeira, M. R., Picos-Corrales, L. A., Moreno-Piraján, J. C., Giraldo, L., Li, C., Pandey, A., Hocquet, D., Torri, G., & Crini, G. (2022). Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2311-2338. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
- Muduli, M., Choudhary, M., & Ray, S. (2023). Remediation and characterization of emerging and environmental pollutants from residential wastewater using a nature-based system. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 45750-45767. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25553-0>
- Murillo-Sierra, J. C., Ruiz-Ruiz, E., Hinojosa-Reyes, L., Guzmán-Mar, J. L., Machuca-Martínez, F., & Hernández-Ramírez, A. (2018). Sulfamethoxazole mineralization by solar photo electro-Fenton process in a pilot plant. *Catalysis Today*, 313, 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.11.003>
- Nations, U. (2018). *Agua | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Parra-Enciso, C., Avila, B. S., Rubio-Clemente, A., & Peñuela, G. A. (2023). Degradation of carbamazepine by the photo-Fenton process. Approach towards the elucidation of

- degradation by-products. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 442, 114801. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114801>
- Pazmino-Sosa, A. G., Blais, J.-F., & Champagne, P. (2024). Effects of 17 α -ethinyl estradiol (EE2) and removal potential by two microalgal species *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus*. *Algal Research*, 82, 103634. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103634>
- Pemberthy M, D., Padilla, Y., Echeverri, A., & Peñuela, G. A. (2020). Monitoring pharmaceuticals and personal care products in water and fish from the Gulf of Urabá, Colombia. *Heliyon*, 6(6), e04215. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04215>
- Quintero, C. S. (2020). *Evaluación de las concentraciones de acetaminofén presentes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga y su efecto tóxico sobre el Allium Cepa*. <http://hdl.handle.net/11634/21502>
- Rodríguez-Rodríguez, C. E., Ramírez-Morales, D., Gutiérrez-Quirós, J. A., Rodríguez-Saravia, S., & Villegas-Solano, D. (2024). Occurrence of pharmaceuticals in Latin America: Case study on hazard assessment and prioritization in Costa Rica. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(8). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12872-z>
- Rubio-Clemente, A., Chica, E. L., & Peñuela, G. A. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y competitividad*, 16(2), 211-223.
- Sánchez Serrano, S., Pedraza Navarro, I., & Donoso González, M. (2022). ¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA?: Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico. *Bordón: Revista de pedagogía*, 74(3), 51-66.

- Serna-Galvis, E. A., Botero-Coy, A. M., Martínez-Pachón, D., Moncayo-Lasso, A., Ibáñez, M., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2019). Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes. *Water Research*, *154*, 349-360. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.045>
- Serna-Galvis, E. A., Botero-Coy, A. M., Rosero-Moreano, M., Lee, J., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2022). An Initial Approach to the Presence of Pharmaceuticals in Wastewater from Hospitals in Colombia and Their Environmental Risk. *Water (Switzerland)*, *14*(6). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w14060950>
- Serna-Galvis, E. A., Martínez-Mena, Y. L., Porras, J., & Torres-Palma, R. A. (2022a). Antibióticos de alto consumo en Colombia, excreción en orina y presencia en aguas residuales—Una revisión bibliográfica. *Ingeniería y competitividad*, *24*(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.24i1.11267>
- Serna-Galvis, E. A., Martínez-Mena, Y. L., Porras, J., & Torres-Palma, R. A. (2022b). Highly consumed antibiotics in Colombia, excretion in urine and the presence in wastewater—A review. *Ingeniería y Competitividad*, *24*(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.24i1.11267>
- Sundararaman, S., Aravind Kumar, J., Deivasigamani, P., & Devarajan, Y. (2022). Emerging pharma residue contaminants: Occurrence, monitoring, risk and fate assessment – A challenge to water resource management. *Science of The Total Environment*, *825*, 153897. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153897>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). *Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado*.

- Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios. (2021). *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado vigencia 2020* | Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios. <https://www.superservicios.gov.co/node/480>
- Tejada, C. (2014). *Contaminantes Emergentes en Aguas: Metabolitos de Fármacos. Una Revisión*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Vieira, Y., Pereira, H. A., Leichtweis, J., Mistura, C. M., Foletto, E. L., Oliveira, L. F. S., & Dotto, G. L. (2021). Effective treatment of hospital wastewater with high-concentration diclofenac and ibuprofen using a promising technology based on degradation reaction catalyzed by Fe⁰ under microwave irradiation. *Science of The Total Environment*, 783, 146991. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146991>
- Zhao, L., Wang, C., Sun, F., Liao, H., Chang, H., & Jia, X. (2024). Assessment of occurrence, partitioning and ecological risk for 144 steroid hormones in Taihu Lake using UPLC-MS/MS with machine learning model. *Chemosphere*, 354, 141598. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141598>

Apéndice A

Sección/Tema	Ítem n.º	Ítem de la lista de verificación	Localización del ítem en el reporte
Título			
Título	1	Identifique el reporte como una revisión sistemática.	1
Resumen			
Resumen estructurado	2	Vea la lista de verificación para resúmenes estructurados de la declaración PRISMA 2020.	5 - 6
Introducción			
Justificación	3	Describa la justificación de la revisión en el contexto del conocimiento existente.	7
Objetivos	4	Proporcione una declaración explícita de los objetivos o las preguntas que aborda la revisión.	10
Métodos			
Criterios de elegibilidad	5	Especifique los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.	15
Fuentes de información	6	Especifique todas las bases de datos, registros, sitios web, organizaciones, listas de referencias y otros recursos de búsqueda o consulta para identificar los estudios. Especifique la fecha en la que cada recurso se buscó o consultó por última vez.	13 - 14
Estrategia de búsqueda	7	Presente las estrategias de búsqueda completas de todas las bases de datos, registros y sitios web, incluyendo cualquier filtro y los límites utilizados.	13
Proceso de selección de los estudios	8	Especifique los métodos utilizados para decidir si un estudio cumple con los criterios de inclusión de la revisión, incluyendo cuántos autores de la revisión cribaron cada registro y cada reporte recuperado, si trabajaron de manera independiente y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.	14
Proceso de extracción de los datos	9	Indique los métodos utilizados para extraer los datos de los informes o reportes, incluyendo cuántos revisores recopilaron datos de cada reporte, si trabajaron de manera independiente, los procesos para obtener o confirmar los datos por parte de los investigadores del estudio y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.	16

Sección/Tema	Ítem n.º	Ítem de la lista de verificación	Localización del ítem en el reporte
Lista de los datos	10a	Enumere y defina todos los desenlaces para los que se buscaron los datos. Especifique si se buscaron todos los resultados compatibles con cada dominio del desenlace (por ejemplo, para todas las escalas de medida, puntos temporales, análisis) y, de no ser así, los métodos utilizados para decidir los resultados que se debían recoger.	14
	10b	Enumere y defina todas las demás variables para las que se buscaron datos (por ejemplo, características de los participantes y de la intervención, fuentes de financiación). Describa todos los supuestos formulados sobre cualquier información ausente (<i>missing</i>) o incierta.	
Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	11	Especifique los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo de los estudios incluidos, incluyendo detalles de las herramientas utilizadas, cuántos autores de la revisión evaluaron cada estudio y si trabajaron de manera independiente y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.	N/A
Medidas del efecto	12	Especifique, para cada desenlace, las medidas del efecto (por ejemplo, razón de riesgos, diferencia de medias) utilizadas en la síntesis o presentación de los resultados.	N/A
Métodos de síntesis	13 ^a	Describa el proceso utilizado para decidir qué estudios eran elegibles para cada síntesis (por ejemplo, tabulando las características de los estudios de intervención y comparándolas con los grupos previstos para cada síntesis (ítem n.º 5).	14 - 16
	13b	Describa cualquier método requerido para preparar los datos para su presentación o síntesis, tales como el manejo de los datos perdidos en los estadísticos de resumen o las conversiones de datos.	
	13c	Describa los métodos utilizados para tabular o presentar visualmente los resultados de los estudios individuales y su síntesis.	
	13d	Describa los métodos utilizados para sintetizar los resultados y justifique sus elecciones. Si se ha realizado un metaanálisis, describa los modelos, los métodos para identificar la presencia y el alcance de la heterogeneidad estadística, y los programas informáticos utilizados.	
	13e	Describa los métodos utilizados para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios (por ejemplo, análisis de subgrupos, metarregresión).	

Sección/Tema	Ítem n.º	Ítem de la lista de verificación	Localización del ítem en el reporte
	13f	Describa los análisis de sensibilidad que se hayan realizado para evaluar la robustez de los resultados de la síntesis.	
Evaluación del sesgo en el reporte	14	Describa los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (derivados de los sesgos en los reportes).	14
Evaluación de la certeza de la evidencia	15	Describa los métodos utilizados para evaluar la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace.	14
Resultados			
Selección de los estudios	16a	Describa los resultados de los procesos de búsqueda y selección, desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.	20
	16b	Cite los estudios que aparentemente cumplían con los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.	18 - 19
Características de los estudios	17	Cite cada estudio incluido y presente sus características.	23 y 35
Riesgo de sesgo de los estudios individuales	18	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada uno de los estudios incluidos.	20 - 21
Resultados de los estudios individuales	19	Presente, para todos los desenlaces y para cada estudio: a) los estadísticos de resumen para cada grupo (si procede) y b) la estimación del efecto y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza), idealmente utilizando tablas estructuradas o gráficos.	27 – 29, 34 - 50
Resultados de la síntesis	20a	Para cada síntesis, resuma brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes.	30, 34, 41 – 44 – 45, 53
	20b	Presente los resultados de todas las síntesis estadísticas realizadas. Si se ha realizado un metaanálisis, presente para cada uno de ellos el estimador de resumen y su precisión (por	

Sección/Tema	Ítem n.º	Ítem de la lista de verificación	Localización del ítem en el reporte
		ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza) y las medidas de heterogeneidad estadística. Si se comparan grupos, describa la dirección del efecto.	
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones sobre las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.	
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.	
Sesgos en el reporte	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (derivados de los sesgos del reporte) para cada síntesis evaluada.	20 - 24
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace evaluado.	24
Discusión			
Discusión	23a	Proporcione una interpretación general de los resultados en el contexto de otras evidencias.	
	23b	Argumente las limitaciones de la evidencia incluida en la revisión.	18 hasta 65
	23c	Argumente las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.	66
	23d	Argumente las implicaciones de los resultados para la práctica, las políticas y las futuras investigaciones.	68
Otra información			
Registro y protocolo	24a	Proporcione la información del registro de la revisión, incluyendo el nombre y el número de registro, o declare que la revisión no ha sido registrada.	
	24b	Indique dónde se puede acceder al protocolo, o declare que no se ha redactado ningún protocolo.	N/A
	24c	Describa y explique cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.	
Financiación	25	Describa las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.	N/A

Sección/Tema	Ítem n.º	Ítem de la lista de verificación	Localización del ítem en el reporte
Conflicto de intereses	26	Declare los conflictos de intereses de los autores de la revisión.	N/A
Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales	27	Especifique qué elementos de los que se indican a continuación están disponibles al público y dónde se pueden encontrar: plantillas de formularios de extracción de datos, datos extraídos de los estudios incluidos, datos utilizados para todos los análisis, código de análisis, cualquier otro material utilizado en la revisión.	N/A

Apéndice B

Descripción	Nivel TRL
Se encuentran los estudios donde muestran la tecnología como una idea o concepto y no hay evidencia experimental o teórica de la misma	1
En este nivel la tecnología se ha formulado de manera precisa y se han identificado los principios científicos que hacen posible la viabilidad de la tecnología.	2
En el presente nivel, la tecnología se ha probado a escala laboratorio comprobando su funcionalidad en condiciones controladas.	3
Se ha construido un prototipo funcional, se ha probado en condiciones controladas.	4
La tecnología se ha probado que funciona en condiciones reales.	5
En este nivel el sistema se ha construido y probado en un entorno relevante (entorno cerrado).	6
El sistema se ha probado en un entorno operativo, donde se evidencia que puede ser utilizado por usuarios finales.	7
Aquí el sistema se ha fabricado demostrando su viabilidad para ser aplicado en un entorno operativo, donde dicha tecnología puede ser aplicada de manera rentable.	8
En este último nivel el sistema ya opera de manera industrial, es económicamente viable y está siendo usado por los usuarios finales en el mercado.	9