

Fecha de recibido: 02-09-2025

Fecha de aceptado: 06-02-2026

DOI: 10.22490/21456453.10346

PRESENCIA DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS EN AGUA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA PARA COLOMBIA

PRESENCE OF PHARMACEUTICAL PRODUCTS IN WATER: A SYSTEMATIC REVIEW FOR COLOMBIA

Andrés J. Bonilla-Reyes¹

Jonny A. Yepes-Blandón²

Miguel A. Navarro-Ramírez³

Citación: Bonilla-Reyes, A. J., Yepes-Blandón, J. A. y Navarro-Ramírez, M. A. (2026). Presencia de productos farmacéuticos en agua: una revisión sistemática para Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(2), 247-283.
<https://doi.org/10.22490/21456453.10346>

¹Estudiante de Maestría en Biología de la Universidad de Antioquia. Grupo de Investigación en Química de los Recursos Naturales - QUIMERA. Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia, y Grupo de Investigación en Organismos Acuáticos Nativos y Exóticos - GIOANE. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. andresjulian.bonilla@udea.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6218-2925>

²Doctor en Biología. Grupo de Investigación en Organismos Acuáticos Nativos y Exóticos - GIOANE. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. jonny.yepes@udea.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6276-5488>

³Doctor en Química. Grupo de Investigación en Química de los Recursos Naturales QUIMERA. Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia. miguel.navarro@unillanos.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5535-4784>

RESUMEN

Contextualización: En las últimas décadas, el creciente uso y la inadecuada disposición de pesticidas, herbicidas, productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs) han generado preocupación por sus efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana.

Vacío del conocimiento: Estos compuestos, que ya han sido detectados en diversos cuerpos de agua en Colombia, incluyen medicamentos de uso humano y veterinario, drogas ilícitas, cosméticos y productos de higiene personal. Sin embargo, no se tiene un panorama nacional sobre su distribución y prevalencia.

Propósito: El objetivo fue evaluar el estado actual del conocimiento sobre la presencia de PPCPs en matrices acuáticas de Colombia.

Metodología: Se realizó una revisión sistemática PRISMA de investigaciones publicadas entre 2012 y 2024, sobre la presencia de PPCPs en muestras de agua en el territorio colombiano a través de diferentes motores de búsqueda, usando operadores booleanos.

Resultados y conclusiones: Se identificaron 116 compuestos diferentes, de los cuales los antibióticos (17,9 %), analgésicos y antiinflamatorios (11,1 %) son los dos grupos más reportados. En particular, la carbamazepina (5,2 %), el diclofenaco (4,9 %) y el ibuprofeno (4,6 %) fueron los compuestos más estudiados. Los tipos de muestra más analizados corresponden a aguas superficiales (26,1 %) y aguas residuales tratadas (23,9 %). Los hallazgos destacan la amplia distribución de estos contaminantes en diferentes matrices acuáticas y subrayan la urgencia de establecer normativas específicas para su monitoreo y control. Esta revisión proporciona una base científica para la gestión del riesgo ambiental asociado a los PPCPs y para la formulación de políticas públicas orientadas a la protección de la calidad del agua en Colombia.

Palabras clave: contaminantes emergentes, residuos farmacéuticos, contaminación acuática, aguas residuales, riesgo ecológico.

ABSTRACT

Contextualization: In recent decades, the increasing use and improper disposal of pesticides, herbicides, pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) have raised concerns about their negative effects on aquatic ecosystems and human health.

Knowledge gap: These compounds, which have already been detected in various bodies of water in Colombia, include human and veterinary drugs, illicit drugs, cosmetics and personal hygiene products. However, there is no national overview of its distribution and prevalence.

Objective: To evaluate the current state of knowledge on the presence of PPCPs in aquatic matrices in Colombia.

Methodology: A PRISMA systematic review of research published between 2012 and 2024 on the presence of PPCPs in water samples in the Colombian territory was carried out through different search engines using Boolean operators.

Results and conclusions: A total of 116 different compounds were identified, of which antibiotics (17.9%); analgesics and anti-inflammatory drugs (11.1%) were the two most reported groups. In particular, carbamazepine (5.2%), diclofenac (4.9%) and ibuprofen (4.6%) were the most studied compounds. The most analyzed sample types correspond to surface water (26.1%) and treated wastewater (23.9%). The findings highlight the wide distribution of these contaminants in different aquatic matrices and underscore the urgency of establishing specific regulations for their monitoring and control. This review provides a scientific basis for the management of environmental risk associated with PPCPs and for the formulation of public policies aimed at protecting water quality in Colombia.

Keywords: Emerging contaminants, pharmaceutical residues, aquatic contamination, wastewater, ecological risk.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores, creado con apoyo de Canva.

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente amenaza a los ecosistemas y a la salud humana ha sido impulsada no solo, por el aumento en el uso de productos como pesticidas, herbicidas y en especial productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs, por sus iniciales en inglés), sino también y en mayor medida por su inadecuada disposición final (Lamb et al., 2024). Estos conta-

minantes emergentes (CE) incluyen grandes grupos como: medicamentos tanto humanos, como veterinarios, drogas ilegales, productos de cuidado personal y cosméticos (PPCPs), los cuales ya han sido detectados en diferentes ecosistemas acuáticos, como aguas superficiales (AS) (Gracia-Lor et al., 2012), sistemas de riego (SR) (Aleán-Flórez et al., 2021), plantas de tratamiento de

aguas residuales (PTAR) (Jiménez-Bambague et al., 2023a; Serna-Galvis et al., 2019b), residuos hospitalarios (RH) (Serna-Galvis et al., 2019a, 2022a) y plantas de tratamiento de aguas potables (PTAP) (Aristizabal-Ciro et al., 2017), entre otros. A partir de la pandemia del COVID-19, se destaca el aumento de algunos analgésicos y antiinflamatorios en matrices como agua, especialmente en las PTAR (Jiménez-Bambague et al., 2023a).

La creciente detección y acumulación de productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs) en ecosistemas acuáticos ha despertado un interés significativo por comprender su origen, distribución y efectos (Das & Raj, 2025). Si bien existen numerosos estudios que documentan la presencia de estos compuestos en agua y peces (Dasenaki & Thomaidis, 2015; da Silva et al., 2025; Morin-Crini et al., 2022; Peña-Guzmán et al., 2019), persiste una notable brecha de conocimiento respecto a sus efectos tóxicos,

especialmente a nivel molecular, celular y fisiológico.

Aunque se ha avanzado en el desarrollo de métodos analíticos para la identificación de PPCPs en compartimentos ambientales y en diferentes organismos, por su parte, los estudios enfocados en sus mecanismos de acción son aún limitados (aus der Beek et al., 2016). En este contexto, la presente revisión tuvo como objetivo evaluar el estado actual del conocimiento sobre la presencia de PPCPs en matrices acuáticas de Colombia, así como resaltar la necesidad de promover estudios toxicológicos más integrales. Esto permitiría fortalecer las estrategias de monitoreo ambiental, generar evidencia técnica para el diseño de políticas públicas de regulación y mejorar la comprensión de los impactos ecológicos de estos contaminantes emergentes en los ecosistemas acuáticos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Criterios de inclusión

La presente revisión incluyó únicamente artículos de investigación en los idiomas inglés, portugués y español. En estos se priorizaron aquellos sobre la presencia y cuantificación de PPCPs en muestras ambientales dulcea-cuículas de Colombia, usando literatura indexada internacional y especializada. Además, se enfocó en los ecosistemas acuáticos como aguas superficiales (AS) (ríos, lagos, lagunas), agua de escorrentía (AE), aguas residuales (AR) (domésticas, industriales y

hospitalarias, ARH-, agua potable (AP), sistemas de riego (SR) y efluentes y afluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (E/A PTAR-) y potables (E/A PTAP).

Criterios de exclusión

Por otra parte, artículos como revisiones, informes, tesis y resúmenes de congresos, así como estudios relacionados con contaminantes diferentes a productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), (p. ej., metales, pesticidas, herbicidas, hidrocarburos y cianotoxinas) no fueron considerados.

Búsqueda y selección de estudios

La búsqueda de literatura se realizó en enero de 2025, tomando como fecha inicial de compilación de información el año 2012 (primer artículo en el que reportó PPCPs para Colombia) hasta diciembre de 2024. Se emplearon las bases de datos Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis por poseer una gran cobertura de revistas en categorías de química ambiental, contaminación, contaminantes emergentes y ecotoxicología, usando las palabras clave: “Pharmaceuticals”, “Emerging contaminants”, “Contamination”, “Water”, “PPCPs” y “Colombia”. Por su parte, se utilizaron operadores booleanos para limitar los resultados obtenidos (“AND” y “OR”). La búsqueda se enfocó en el título, resumen y palabras claves. Los artículos se revisaron y evaluaron de manera manual e independiente para determinar su elegibilidad para el respectivo análisis. Todas las etapas del proceso de selección de artículos se documentaron en un diagrama de flujo, siguiendo las directrices de los Elementos de Informe Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis (PRISMA) (Moher et al., 2009; Page et al., 2021).

Limitaciones metodológicas

La presente revisión sistemática ofrece un panorama basado en evidencia arbitrada, no obstante, se reconoce un sesgo inheren-

te asociado a la exclusión de literatura gris y repositorios institucionales. Es probable que existan datos preliminares, en tesis de pregrado o posgrados no indexadas, sobre regiones poco estudiadas, como la Orinoquía o la Amazonía. Sin embargo, la decisión de excluir estas fuentes obedeció a la falta de estandarización analítica y a la dificultad de verificar la calidad de los datos. Por otro lado, algunos estudios no reportan las fechas de muestreo, por tanto, el presente trabajo constituye el primer paso para la construcción de una línea base de la presencia de PPCPs en Colombia. Asimismo, los vacíos de la información en gran parte del territorio nacional no deben interpretarse como ausencia de riesgo, sino como una evidencia de la necesidad urgente de fortalecer los monitoreos en todas las regiones.

Recopilación de datos

La información de cada estudio ($n=23$) fue extraída y organizada de manera manual en el *software* Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2025). Mediante esta herramienta se procesaron los datos descriptivos y se generaron las representaciones gráficas correspondientes, considerando las siguientes variables: departamento estudiado, tipo de contaminante (estudiado y detectado), tipo de matriz hídrica, concentraciones reportadas, método analítico, año de realización del estudio y bibliografía.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la revisión bibliográfica y los criterios de exclusión se detallan en la figura 1. La búsqueda inicial tuvo un total 237 artículos, de los cuales 223 fueron obtenidos en las bases de datos y 14 a través de fuentes complementarias (bibliografía o recomendaciones). Se identificaron 31 artículos duplicados que fueron eliminados, quedando en total 206 estudios. Posterior a una revisión de títulos y resúmenes, quedaron 150 artículos, de los cuales se excluyeron 54 por no cumplir los criterios de inclusión

para esta revisión. Los 96 artículos seleccionados fueron analizados detalladamente y, en consecuencia, se seleccionaron 23 artículos que cumplieran con los criterios establecidos en este trabajo. La caracterización de los artículos analizados se encuentra disponible en la información suplementaria, donde se detalla la información descrita anteriormente en la recopilación de los datos (ver tabla S1). Asimismo, en la tabla S2 se consolidan los 116 compuestos detectados y su respectiva clasificación por grupo terapéutico.

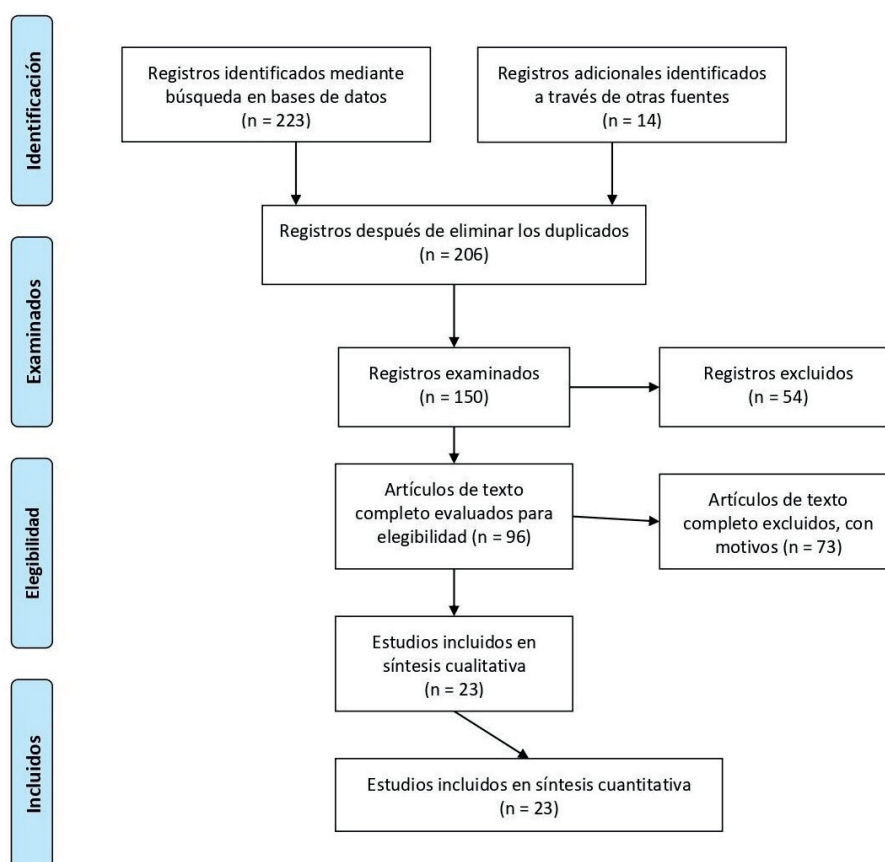


Figura 1. Diagrama de flujo de la búsqueda y selección de artículos en el proceso de la revisión sistemática

Fuente: autores.

Para esta revisión (hasta 2024), en Colombia se han estudiado 116 compuestos, clasificados en: antibióticos, analgésicos y antiinflamatorios, reguladores de lípidos en sangre, antihipertensivos, drogas ilícitas, neurológicos, antiepilépticos, medios de contraste, hormonas, filtros UV de protectores solares, antiparasitarios, fenoles, fármacos metabólicos y metabolitos, conservantes, productos médicos, endulzantes, fragancias, agentes antimicrobianos y β -bloqueadores, donde los antibióticos, analgésicos y antiinflamato-

rios son los grupos más estudiados (17,9 % y 11,1 %, respectivamente) (Figura 2.). De manera puntual, la carbamazepina (neurológico), diclofenaco e ibuprofeno (analgésicos y antiinflamatorios) son los compuestos más estudiados (5,2 %, 4,9 % y 4,6 %, respectivamente) (Figura 3.). Así mismo, los tipos de agua más analizados son AS y E-PTAR (26,0 % y 24,0 %, respectivamente), le siguen otras matrices relacionadas a las PTAR e incluso a AP y PTAP (Figura 4.).

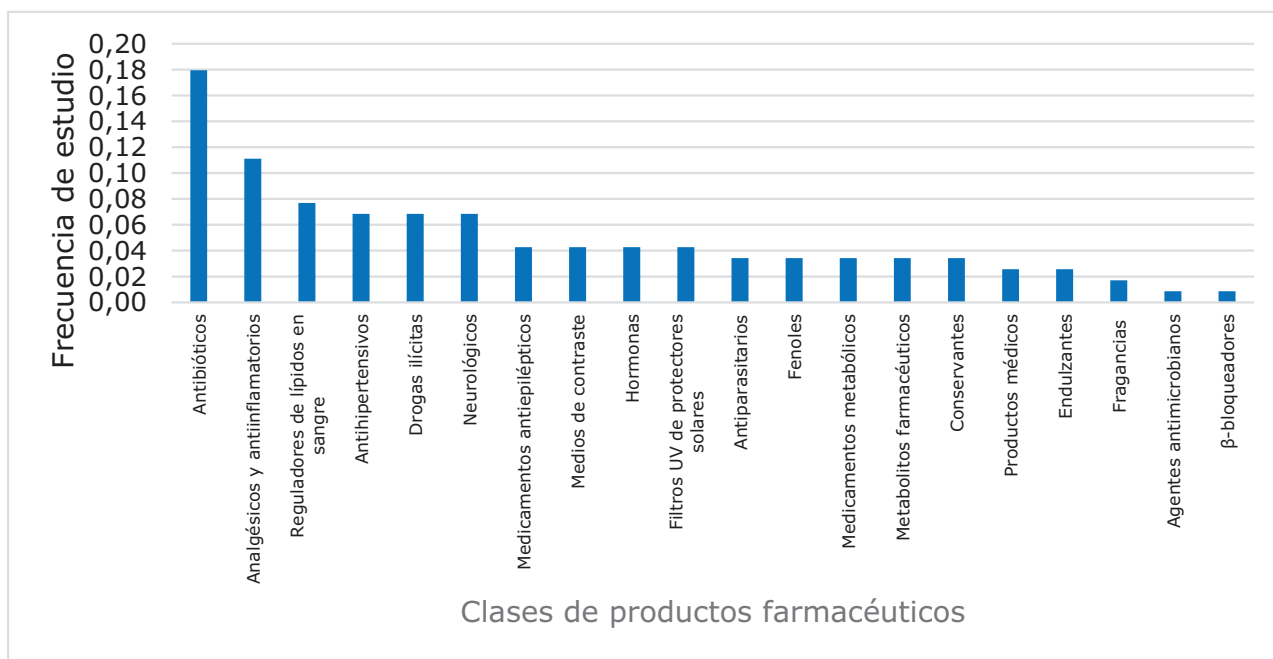


Figura 2. Frecuencia de mayor a menor estudio, agrupados por clases de productos farmacéuticos en el agua de Colombia

Fuente: autores.

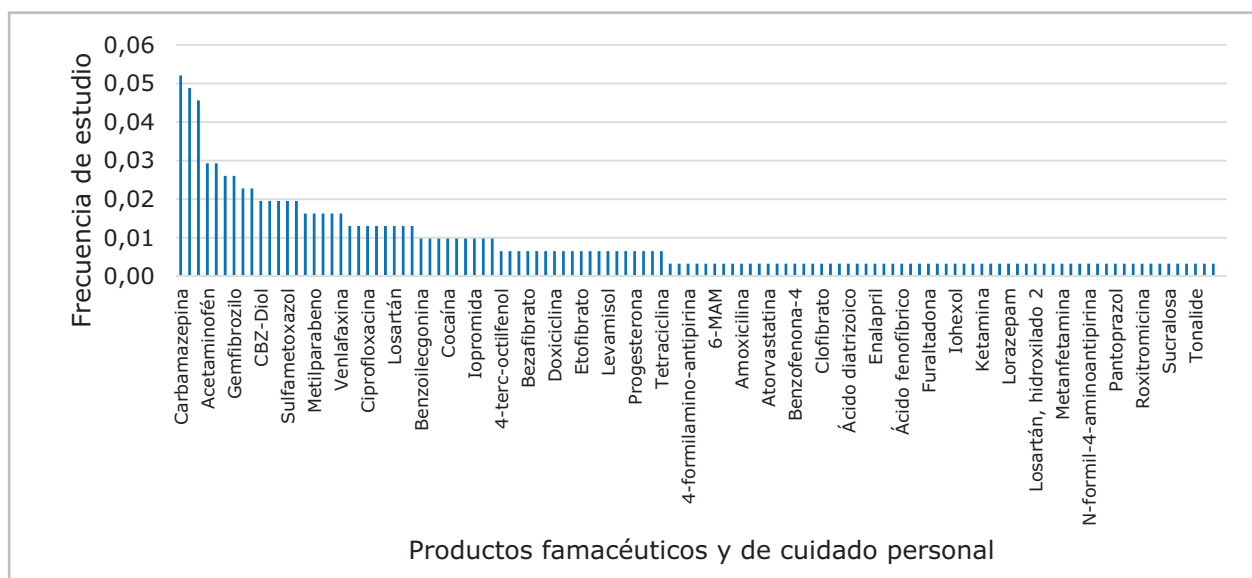


Figura 3. Frecuencia de mayor a menor de los 116 PPCPs estudiados en el agua de Colombia

Fuente: autores.

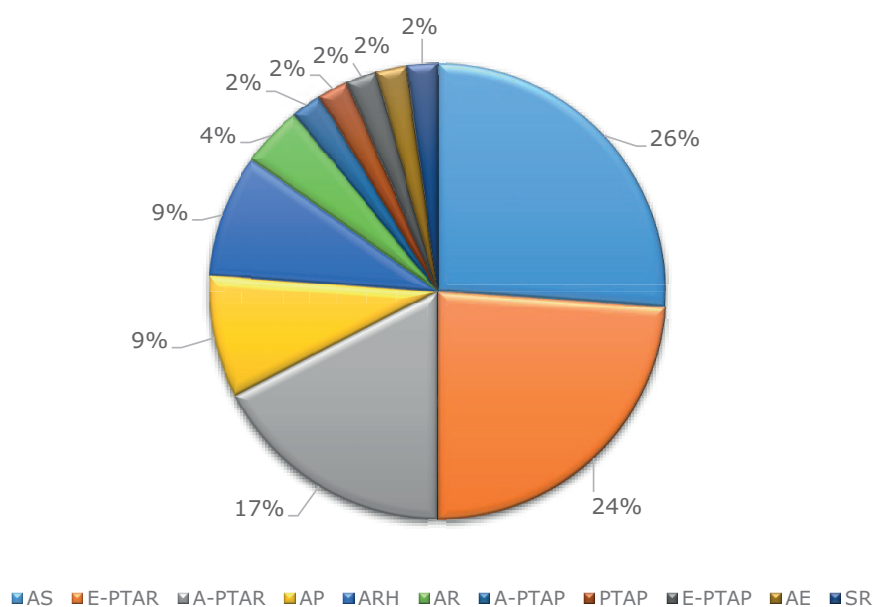


Figura 4. Tipos de agua analizados para la detección de PPCPs en Colombia. AS: aguas superficiales, E-PTAR: efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, A-PTAR: afluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, AP: aguas potables, ARH: aguas residuales hospitalarias, AR: aguas residuales, PTAP: planta de tratamiento de aguas potables, A-PTAP: afluente de planta de tratamiento de aguas potables, E-PTAP: efluente de planta de tratamiento de aguas potables, AE: agua de escorrentía, SR: sistemas de riego

Fuente: autores.

Fuentes de distribución de los PPCPs

La contaminación por PPCPs en los ecosistemas acuáticos se origina principalmente por rutas como la lixiviación y las plantas de tratamiento de aguas residuales e industriales (Daughton & Ternes, 1999; Lamb et al., 2024), las cuales, a través del sistema de alcantarillado, recogen los diferentes vertimientos de los hogares.

Colombia, con 1103 municipios (DANE, 2025a), tiene 624 (57 %) municipios sin ningún sistema de tratamiento de aguas residuales (Bustos-Murillo et al., 2023). Por su parte, solo 9 de los 32 departamentos (Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Córdoba, Nariño, Santander, Risaralda, Cauca y Caquetá) tienen algún tipo de estudio sobre la presencia de productos farmacéuticos en la matriz agua, de los cuales Antioquia, con un total de 9 estudios de los

32 reportados, es el departamento con el mayor número de estudios en el país (Figura 5). Cabe resaltar que las zonas con mayor frecuencia de estudio se centran en la región Andina, coincidiendo con la mayor densidad poblacional de viviendas (DANE, 2025b) y con procesos de la industria manufacturera del país (Fuentes-López et al., 2019). Estos estudios se han centrado sobre la cordillera Occidental y Central, especialmente en las principales ciudades (Bijlsma et al., 2016) y en la cuenca Magdalena-Cauca (Cerón & Peñuela, 2024). Asimismo, se ha evidenciado que, debido a las características de funcionamiento de las PTAR, no son apropiadas para depurar PPCPs, siendo así ineficientes para su remoción (Arrubla et al., 2016; Jiménez-Bambague et al., 2020a), lo que genera un riesgo que afecta la calidad de los ecosistemas acuáticos. Por su parte, sobre la cordillera Oriental, especialmente en la región de la Orinoquia hasta el momento no se cuenta con estudios sobre CE.

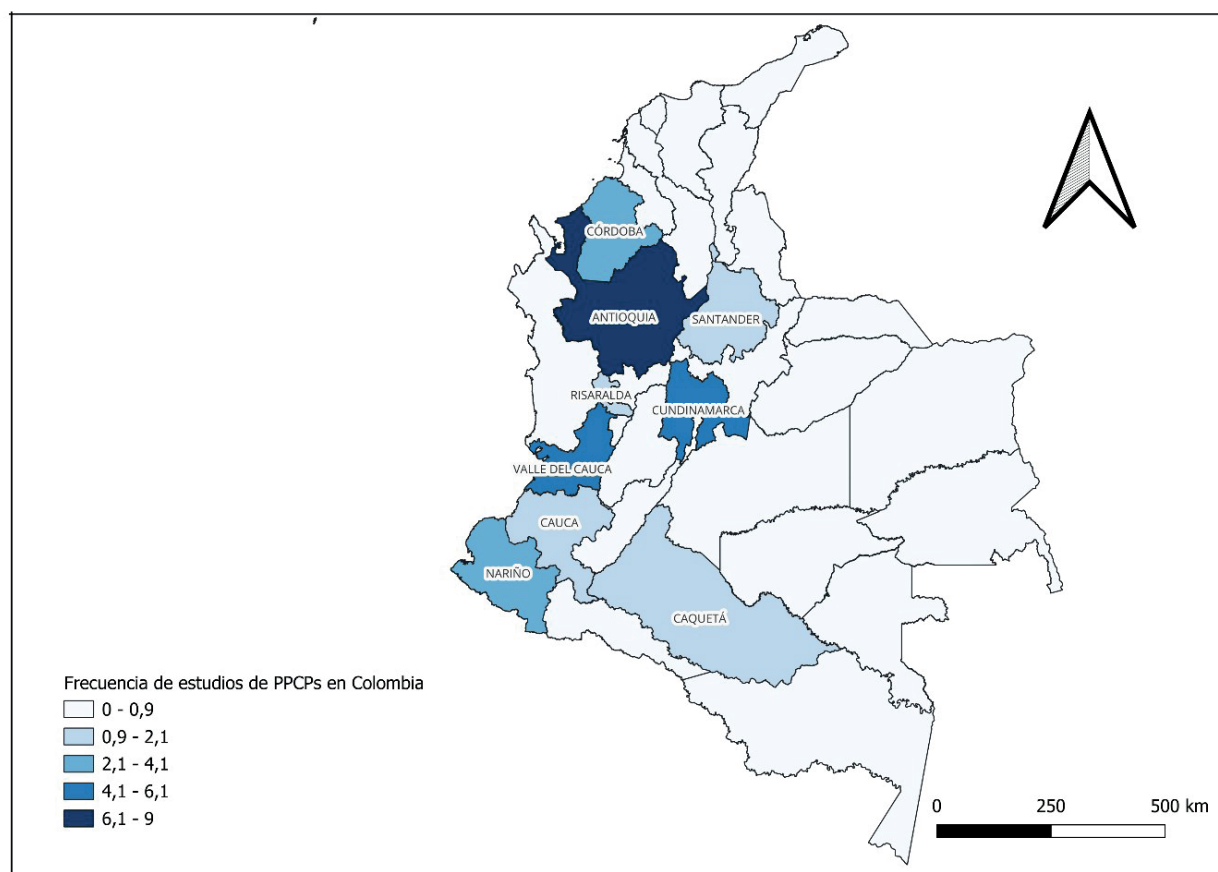


Figura 5. Distribución de la frecuencia de estudios de PPCPs en los departamentos de Colombia. El azul más oscuro hace referencia a los departamentos que más presentan estudios

Fuente: autores.

Antibióticos

Dentro del grupo de los antibióticos de uso humano y veterinario, se han estudiado 21 compuestos, de los cuales se destacan amoxicilina, dicloxacilina, cefalexina y ciprofloxacina como los antibióticos con el mayor volumen de ventas y, por lo tanto, de consumo para el tratamiento de infecciones bacterianas (Serna-Galvis et al., 2022b). Sin embargo, dada su alta resistencia, poca degradación de manera natural y la ineficiencia de las PTAR para su adecuada remoción, la trimetoprima es el antibiótico más

analizado. La trimetoprima fue inicialmente detectada en 2015 (Hernández et al., 2015) y posteriormente cuantificada en AP, RW, AR, ARI, ARH y AS con una concentración entre 0,21 y 21,84 $\mu\text{g/L}$ (Bedoya-Ríos et al., 2018; Botero-Coy et al., 2018; Madera-Parra et al., 2018; Serna-Galvis et al., 2019a, 2019b, 2022a). A su vez, antibióticos como claritromicina, sulfametoxazol y clindamicina, debido a su alta efectividad contra diferentes bacterias y bajo índice de efectos negativos en humanos, promueve a un aumento no regulado en su consumo. Lo anterior, sumado a la ineficiencia de las PTAR, conduce a

que diferentes comunidades bacterianas que se encuentren expuestas constantemente a presiones selectivas antibióticas generen un acelerado desarrollo de resistencia a los antibióticos en humanos y animales, lo que fomenta la transferencia de genes de resistencia (Larsson & Flach, 2022; Martínez, 2009).

Analgésicos y antiinflamatorios

Dentro de esta categoría, en Colombia, se han estudiado mayormente 13 compuestos. De los cuales, el diclofenaco es el más detectado y cuantificado en los diferentes tipos de agua. Varios estudios reportan su presencia de manera constante (Arrubla et al., 2016; Gracia-Lor et al., 2012; Jiménez-Bambague et al., 2023), con concentraciones entre 0,12 y 92,1 µg/L (Botero-Coy et al., 2018; Gallego-Ríos & Peñuela, 2021; Hernández et al., 2015; Jiménez-Bambague et al., 2020a, 2020b, 2023a; Madera-Parra et al., 2018; Pemberthy et al., 2020; Serna-Galvis et al., 2019a, 2019b, 2022). Le siguen en este orden, ibuprofeno, acetaminofén, naproxeno y ketoprofeno, confirmándose como los analgésicos más prescritos y usados en las ciudades (Solano y Garavito, 2013; Valladales-Restrepo et al., 2022).

Otros productos farmacéuticos

En esta categoría, la carbamazepina es el compuesto más analizado y detectado (Figura 2.), con concentraciones entre 0,012 y 36,92 µg/L, siendo el río Bogotá (Madera-Parra et al., 2018) la matriz analizada con la mayor concentración, le sigue un distrito de riego en el departamento de Córdoba con una concentración de 23,46 µg/L (Aleán-Fló-

rez et al., 2021). Este fármaco, que tiene un uso antiepiléptico y neurológico, se ha descrito como un indicador de la presencia de aguas residuales al ser un compuesto antropogénico y recalcitrante (Wolf et al., 2012).

Efectos de productos farmacéuticos en peces

Dada la preocupación por la presencia de estos contaminantes en las aguas superficiales y su “efecto cóctel” en las mezclas complejas (Cleuvers, 2004; Pawłowska, 2025), se ha impulsado el estudio de la bioacumulación de estos productos y cómo los peces están respondiendo a estas mezclas complejas. En un contexto global, en los peces Dorada (*Sparus aurata*) y Lubina (*Perciformes*) se han detectado más de 100 PPCPs en tejido muscular (Dasenaki & Thomaidis, 2015); además, en otras especies, como el Barbo del Ebro (*Luciobarbus graellsii*), Carpa común (*Cyprinus carpio*), Anguila europea (*Anguilla anguilla*) y Múgil (*Liza ramada*), se han detectado un total de 30 compuestos, no solo en su tejido muscular sino también en sus diferentes órganos (Manjarrés-López et al., 2023). En Colombia, en el tejido muscular del bagre rayado del Magdalena (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*), una especie importante en la pesquería y la seguridad alimentaria para las cuencas del Magdalena-Cauca, Atrato y Sinú, se han detectado metilparabeno (32 µg/kg), carbamazepina (44,48-90,80 µg/Kg) (Cacua-Ortiz et al., 2020), diclofenaco (6,20-8,80 µg/Kg) (Gallego-Ríos & Peñuela, 2021) y triclosán (20,21-54,67 µg/Kg) (Zapata & Peñuela, 2021). Esto plantea preocupaciones tanto ecológicas como en la seguridad

alimentaria, porque la presencia de estos compuestos en el tejido muscular de *P. magdaleniatum* sugiere una persistencia sistémica y la posibilidad de biomagnificación a través de la red trófica. Esto implica considerar futuras evaluaciones de riesgos en las diferentes comunidades que hagan consumo de este pescado o con aguas que presenten estos contaminantes.

En estudios recientes sobre los efectos de algunos PPCPs en la expresión génica en peces, se ha evidenciado que el triclocarbán (antimicrobiano), a concentraciones entre 5 y 50 µg/L. induce una sobreexpresión del gen C-FOS y subexpresión del gen BDNF en el cerebro de larvas del pez cebra (*Danio rerio*). La afectación a ambos genes, asociados al funcionamiento sináptico y la activación neuronal, sugiere alteraciones en la plasticidad y el desarrollo cerebral (Lucon-Xiccato et al., 2023). En individuos posjuveniles de *Clarias gariepinus* se ha estudiado el impacto toxicogenómico del ibuprofeno y el ftalato de dibutilo, encontrando alteraciones en la expresión génica de la hormona de crecimiento (GH), interleucina-1 beta (IL-1 β), receptores de melatonina (MEL1C), 17 β -hidroxiesteroide deshidrogenasa (HSD17B2), proteína de choque (HSP70), el factor de transcripción de *doublesex* y *mab-3* (DMRT1), con una sobreexpresión de proteína *forkhead* L2 (FOXL2) y del citocromo p450 (CYP11A1) (Ogunwole et al., 2024).

Por otro lado, algunos antibióticos, como ciprofloxacina, trimetoprima y sulfadiazina, han demostrado modular la transcripción de genes del eje hipotálamo-hipofisario-tiroideo-interrenal, específicamente la

hormona liberadora de tirotropina (TRH) y la proteína transportadora de la hormona liberadora de corticotropina (CRHBP, por sus iniciales en inglés). Asimismo, en *Sparus aurata*, se reportaron alteraciones en marcadores de estrés oxidativo, como catalasa (CAT), glutatión reductasa (GR) y peroxidación lipídica (LPO) (Fernández et al., 2022). De manera complementaria, la exposición aguda y crónica al antibiótico eritromicina en la misma especie *S. aurata* mostró una reducción de los niveles de glutatión peroxidasa (GPx) en el hígado, con un aumento en las branquias, así como una elevación en la actividad de glutatión reductasa (GRd) hepática y una disminución de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS, por sus iniciales en inglés), todos ellos indicadores de estrés oxidativo (Rodrigues et al., 2019). Finalmente, también en *S. aurata* como modelo de especie íctica marina, se ha evaluado el efecto combinado de una mezcla de carbamazepina, cloruro de cadmio y éter difenílico polibromado, evidenciando alteraciones en la expresión génica de IL1- β , IL-6, IL-8 en el hígado e intestino, los cuales están implicados en la regulación de procesos de inmunidad y antiinflamatorios (Espinosa-Ruiz et al., 2021).

Debido a que todo el ecosistema y en especial los humanos estamos expuestos a los PPCPs, por múltiples vías, como el consumo de agua, el contacto con aguas de uso recreacional y la ingesta de productos con bioacumulación de estos compuestos, es de vital importancia determinar la presencia de PPCPs y su concentración en los ecosistemas acuáticos, así como estimar los efectos biológicos que pueden inducir, como los genotóxicos (Jacquin et al., 2020; Picinini-

Zambelli et al., 2025). Lo anterior es fundamental para la creación de políticas públicas que estén orientadas a mitigar sus impactos negativos en la biodiversidad y en la salud pública (Souza et al., 2022).

Normatividad en Colombia

Para Colombia, Caviedes-Rubio et al. (2017) presentaron una revisión sobre la normativa ambiental, dirigida a la regulación de la presencia de productos farmacéuticos en ecosistemas acuáticos, evidenciando el desarrollo de políticas públicas específicas para la gestión de estos contaminantes. Hasta la fecha, el país se enfoca en la gestión integral de los residuos sólidos con la Resolución 2184 (MADS, 2019), residuos peligrosos (RESPEL) con el Decreto 1076 (MADS, 2015a) y en la devolución de medicamentos vencidos posconsumo, según la Resolución 0371 (MAVDT, 2009), con el fin de mitigar la contaminación por la disposición inadecuada de estas sustancias. Sin embargo, estas medidas están orientadas hacia la prevención y el control dentro del ciclo comercial y productivo, sin una regulación específica que aborde la contaminación de los PPCPs en el agua. La ausencia de normatividad específica en este tema resalta la necesidad de fomentar diversas estrategias de monitoreo, control y mitigación de estas sustancias. Asimismo, existen las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) por jurisdicción según la Ley 99, Art. 31 (CRC, 1993), que son las encargadas de aplicar las normativas ambientales en cada región. Entre sus actos administrativos se encuentran licencias de vertimientos, campañas de disposición de residuos, manejo de redes de

alcantarillado y la adecuación de plantas de tratamientos de aguas residuales. A diferencia del contexto colombiano, donde la regulación se limita a parámetros fisicoquímicos básicos, según la Resolución 0631 (MADS, 2015b), organismos internacionales han avanzado hacia la priorización de contaminantes específicos. La Unión Europea, a través de la Directiva Marco del Agua, estableció una “Lista de Observación” que obliga al monitoreo de sustancias emergentes, como diclofenaco, ibuprofeno, macrólidos (eritromicina, claritromicina, azitromicina) y, más recientemente, carbamazepina, algunos de ellos en sustancias prioritarias (European Commission, 2022a, 2022b); curiosamente, estos coinciden con los compuestos más frecuentemente detectados en los cuerpos de agua de Colombia, según esta revisión. Asimismo, la EPA en Estados Unidos utiliza la “Lista de Contaminantes Candidatos (CCL, por sus iniciales en inglés)” para identificar contaminantes no regulados en el agua potable que requieren investigación prioritaria (US EPA, 2022). La ausencia de una lista similar en Colombia impide la gestión eficaz del riesgo sanitario y ambiental.

Limitaciones de esta revisión

A pesar de los avances metodológicos para detectar contaminantes emergentes (CE) en cuerpos de agua y organismos acuáticos, la mayoría de los estudios se han enfocado en aguas superficiales y en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En estas últimas, los trabajos se han dirigido a la búsqueda de tecnologías o estrategias para mitigar la presencia de dichos compuestos (Li et al., 2024; Osuoha et al., 2023). No obstante,

en el contexto colombiano, los estudios que evalúan la bioacumulación o los efectos de los CE en peces son escasos. Esta limitación impide establecer lineamientos regulatorios con un enfoque nacional, restringiendo las decisiones principalmente al ámbito local o regional. Por otro lado, se reconoce una limitación metodológica al excluir literatura gris y otras bases de datos, por lo que podría subestimar la cantidad de estudios utilizados en la presente revisión. Sin embargo, con esta revisión se plantea un primer escenario nacional, aportando a un consolidado de la presencia de PPCPs en Colombia.

Recomendaciones para futuras investigaciones

Esta revisión destaca la importancia de profundizar en investigaciones orientadas

a evaluar los efectos de las mezclas complejas de productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), especialmente a concentraciones ambientalmente relevantes. En el contexto colombiano, se recomienda ampliar la cobertura geográfica y la variedad de ecosistemas estudiados, con el propósito de construir un diagnóstico nacional más representativo. Además, es fundamental abordar las posibles interacciones sinérgicas o antagónicas entre estos compuestos, así como sus efectos acumulativos a lo largo de la cadena trófica. Asimismo, se sugiere explorar los mecanismos moleculares que subyacen a las respuestas biológicas observadas, integrando enfoques de biología molecular y tecnologías ómicas que permitan comprender con mayor profundidad las consecuencias ecológicas de estos contaminantes.

4 CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática presenta un diagnóstico nacional sobre PPCPs en Colombia, donde se identificaron 116 compuestos farmacéuticos distribuidos en diversas matrices hídricas, con una predominancia de antibióticos y analgésicos/antiinflamatorios. Específicamente, la carbamazepina, el diclofenaco y el ibuprofeno se perfilan como los marcadores de contaminación antropogénica más ubicuos en el país.

Respecto a la frecuencia nacional de los estudios se revela una asimetría, donde las investigaciones se concentran en la región Andina, liderada por el departamento de Antioquia, lo cual se asocia con la mayor

densidad demográfica e industrial del territorio. En contraste, la ausencia de reportes indexados en regiones como la Orinoquía no debe interpretarse como ausencia de riesgo, sino como un vacío en la infraestructura de monitoreo que requiere atención inmediata para establecer líneas base en los diferentes ecosistemas.

Asimismo, la detección frecuente de estos compuestos en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (E-PTAR) evidencia la insuficiencia de las tecnologías convencionales implementadas en el país para la remoción de estos contaminantes. Esta persistencia genera un escenario de exposición

crónica y de mezclas complejas en las aguas superficiales receptoras, implicando riesgos ecotoxicológicos subletales, como genotoxicidad y disrupción endocrina, para la ictiofauna nativa y un riesgo para la salud pública.

En consecuencia, los hallazgos aquí sintetizados trascienden el diagnóstico y subrayan la urgencia de crear/actualizar la normativa

colombiana para la gestión ambiental. Además, es imperativo transitar del monitoreo fisicoquímico básico hacia la regulación específica de contaminantes emergentes y la modernización de los sistemas de tratamiento, garantizando así la seguridad hídrica y la integridad ecológica de los recursos neotropicales.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: conceptualización, metodología, investigación, análisis de datos, redacción, borrador original, revisión y edición.

Autor 2: investigación, conceptualización, análisis de datos, redacción, revisión y edición, supervisión.

Autor 3: investigación, conceptualización, análisis de datos, redacción, revisión y edición, logística, supervisión, administración del proyecto, adquisición del recurso.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores José Ariel Rodríguez Pulido y Luz Yaneth Orozco

Jiménez por los comentarios y sugerencias en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

Este artículo forma parte del proyecto “C10-F02-004-2024” financiado por la Universidad de los Llanos, a través de la Convocatoria para el Fortalecimiento de las Capacidades Científicas, Tecnológicas y de

Innovación Articuladas con la Agenda Institucional de Investigaciones: Área de Investigación en Biodiversidad, Medioambiente y Desarrollo Sustentable 2024.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de tipo financiero, profesional o personal, que hayan afectado de

manera directa o indirecta al desarrollo de la presente revisión.

LITERATURA CITADA

- Alean, 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 [Material suplementario]. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 12(2). <https://doi.org/10.22490/21456453.4231>
- Aleán-Flórez, J. D., Márquez Méndez, D. S., Burgos Núñez, S. M., Enamorado-Montes, G. H. y Marrugo Negrete, J. L. (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>
- Aristizabal-Ciro, C., Botero-Coy, A. M., López, F. J., & Peñuela, G. A. (2017). Monitoring pharmaceuticals and personal care products in reservoir water used for drinking water supply. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(8), 7335-7347. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8253-1>
- Arrubla, J. P., Cubillos, J. A., Ramírez, C. A., Arredondo, J. A., Arias, C. A., & Paredes, D. (2016). Pharmaceutical and personal care products in domestic wastewater and their removal in anaerobic treatment systems: Septic tank – up flow anaerobic filter. *Ingeniería e Investigación*, 36(1), 70-78. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n1.53076>
- aus der Beek, T., Weber, F., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A., & Küster, A. (2016). Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(4), 823-835. <https://doi.org/10.1002/etc.3339>
- Bedoya-Ríos, D. F., Lara-Borrero, J. A., Duque-Pardo, V., Madera-Parra, C. A., Jimenez, E. M., & Toro, A. F. (2018). Study of the occurrence and ecosystem danger of selected endocrine disruptors in the urban water cycle of the city of Bogotá, Colombia. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53(4), 317-325. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1401372>
- Bijlsma, L., Botero-Coy, A. M., Rincón, R. J., Peñuela, G. A., & Hernández, F. (2016). Estimation of illicit drug use in the main cities of Colombia by means of urban wastewater analysis. *Science of The Total Environment*, 565, 984-993. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.078>
- 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. y 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>
- Cacua-Ortiz, S. M., Aguirre, N. J., & Peñuela, G. A. (2020). Methyl Paraben and Carbamazepine in Water and Striped Catfish (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) in the Cauca and Magdalena Rivers. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 105(6), 819-826. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03028-z>
- Caviedes-Rubio, D. I., Delgado, D. R. y Amaya, A. O. (2017). Normatividad ambiental dirigida a regular la presencia de los productos farmacéuticos residuales en ambientes acuáticos. *Revista Jurídica Piélagus*, 16(1). <https://journalusco.edu.co/index.php/pielagus/article/download/1445/3604>
- Cerón-Vivas, A., & Peñuela Mesa, G. A. (2024). Environmental risk assessment of pharmaceutical pollutants in the Oro River Sub-basin (Colombia). *Environmental Research*, 252, 118951. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118951>
- Cleuvers, M. (2004). Mixture toxicity of the anti-inflammatory drugs diclofenac, ibuprofen, naproxen, and acetylsalicylic acid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 59(3), 309-315. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00141-6)
- Congreso de la República de Colombia [CRC]. (1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.
- da Silva, A. C., Alves de Oliveira, L. V., Amaral Alexandre, L., Rocha Ribas, M., Lemos Dal Pizzol, J., Rocha, G., Kasuko Palmeiro, J., Perin, M., Hoff, R., & Verruck, S. (2025). Suspect screening and quantitative analysis of 165 contaminants of emerging concern in water, sediments, and biota using LC-MS/MS: Ecotoxicological and human health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 963, 178434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178434>
- Das, R., & Raj, D. (2025). Sources, distribution, and impacts of emerging contaminants – a critical review on contamination of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100602>
- Dasenaki, M. E., & Thomaidis, N. S. (2015). Multi-residue determination of 115 veterinary drugs and pharmaceutical residues in milk powder, butter, fish tissue and eggs using liquid chromatography–

- tandem mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 880, 103-121. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.013>
- Daughton, C., & Ternes, T. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives*, 107(suppl 6), 907-938. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1566206/>
- 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 [Material suplementario]. *Water Research*, 187, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116448>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2025a). *Geoportal del DANE - Codificación Divipola*. <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/territorio/consulta-divipola-division-politico-administrativa-de-colombia/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2025b). *Viviendas, Hogares y Personas (VIHOPE)*. <https://dane.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=e53e1178fb1f497cac9b241dba1690>
- Espinosa-Ruiz, C., Manuguerra, S., Morgheze, M., García-Beltrán, J. M., Esteban, M. Á., Giuga, M., Messina, C. M., & Santulli, A. (2021). Immunity and inflammatory responses in gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) exposed to sub-lethal mixture of carbamazepine, cadmium chloride and polybrominated diphenyl ether. *Fish & Shellfish Immunology*, 111, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.12.013>
- European Commission. (2022a). *Commission Implementing Decision (EU) 2022/1307 of 22 July 2022 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council*. https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2022/1307/oj/eng
- European Commission. (2022b). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2000/60/EC, Directive 2006/118/EC and Directive 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy (COM/2022/540 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0540>
- Fernández, R., Colás-Ruiz, N. R., Martínez-Rodríguez, G., Lara-Martín, P. A., Mancera, J. M., Trombini, C., Blasco, J., & Hampel, M. (2022). The antibacterials ciprofloxacin, trimethoprim and sulfadiazine modulate gene expression, biomarkers and metabolites associated with stress and growth in gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquatic Toxicology*, 250, 106243. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106243>
- Fuentes-López, H. J., Jiménez Reyes, L. C. y Pérez Forero, N. A. (2019). La demografía industrial en Colombia: Localización y relocalización de la actividad manufacturera. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 43-65.

<https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66823>

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>

Gracia-Lor, E., Martínez, M., Sancho, J. V., Peñuela, G., & Hernández, F. (2012). Multi-class determination of personal care products and pharmaceuticals in environmental and wastewater samples by ultra-high performance liquid-chromatography-tandem mass spectrometry. *Talanta*, 99, 1011-1023. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.07.091>

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>

Jacquín, L., Petitjean, Q., Côte, J., Laffaille, P., & Jean, S. (2020). Effects of Pollution on Fish Behavior, Personality, and Cognition: Some Research Perspectives. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 86. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00086>

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A. y Peña-Salamanca, E. J. (2020a). Eliminación de compuestos farmacéuticos

presentes en el agua residual doméstica mediante un tratamiento primario avanzado. *Ingeniería y Competitividad*, 22(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v22i1.8794>

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., Ortiz-Escobar, A. C., Morales-Acosta, P. A., Peña-Salamanca, E. J., & Machuca-Martínez, F. (2020b). High-rate algal pond for removal of pharmaceutical compounds from urban domestic wastewater under tropical conditions. Case study: Santiago de Cali, Colombia. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 82(6), 1031-1043. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.362>

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., & Machuca-Martínez, F. (2023a). The occurrence of emerging compounds in real urban wastewater before and after the COVID-19 pandemic in Cali, Colombia. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 33, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100457>

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., Rangel-Delgado, M. F., Quintero-Martínez, I., Miranda-Mosquera, D., Aristizabal-Apolinar, J. S., & Machuca-Martínez, F. (2023b). Photo-Fenton and Electro-Fenton performance for the removal of pharmaceutical compounds in real urban wastewater. *Electrochimica Acta*, 442, 141905. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.141905>

Lamb, I., Massam, M., Mills, S., Bryant, R., & Edwards, D. (2024). Global threats of extractive industries to vertebrate biodiver-

- sity. *Current Biology*, 34(16), 3673-3684. e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.06.077>
- Larsson, D. G. J., & Flach, C.-F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews. Microbiology*, 20(5), 257-269. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x>
- Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>
- Lucon-Xiccato, T., Savaşçı, B. B., Merola, C., Benedetti, E., Caioni, G., Aliko, V., Bertolucci, C., & Perugini, M. (2023). Environmentally relevant concentrations of triclocarban affect behaviour, learning, and brain gene expression in fish. *Science of The Total Environment*, 903, 166717. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166717>
- Madera-Parra, C. A., Jiménez-Bambague, E. M., Toro-Vélez, A. F., Lara-Borrero, J. A., Bedoya-Ríos, D. F. y Duque-Pardo, V. (2018). Estudio exploratorio de la presencia de microcontaminantes en el ciclo urbano del agua en Colombia: caso de estudio Santiago de Cali. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), 475-487. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.10>
- Manjarrés-López, D. P., Peña-Herrera, J. M., Benejam, L., Montemurro, N., & Pérez, S. (2023). Assessment of wastewater-borne pharmaceuticals in tissues and body fluids from riverine fish. *Environmental Pollution*, 324, 121374. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121374>
- Martínez, J. (2009). The role of natural environments in the evolution of resistance traits in pathogenic bacteria. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1667), 2521-2530. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0320>
- Martínez & Peñuela, G. A. (2012). Analysis of triclosan and 4n-nonylphenol in Colombian reservoir water by gas chromatography-mass spectrometry [Material suplementario]. *Water and Environment Journal*, 27(3), 387-395. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00360.x>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2015a). Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2015b). Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [MADS]. (2019). Resolución 2184 de 2019. Por la cual se modifica la Resolución 668 de 2016 sobre uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. [MAVDT]. (2009). Resolución 0371 de 2009. Por la cual se establecen los elementos que deben ser considerados en los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Fármacos o Medicamentos Vencidos.
- Microsoft Corporation. (2025). *Microsoft Excel* (Versión de Microsoft 365) [Software informático].
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, T. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- 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). World-wide cases of water pollution by emerging contaminants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 2311-2338. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
- Ogunwole, G. A., Adeyemi, J. A., Saliu, J. K., & Olorundare, K. E. (2024). A computational analysis of the molecular mechanisms underlying the effects of ibuprofen and dibutyl phthalate on gene expression in fish. *Heliyon*, 10(11), e31880. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31880>
- Osuoha, J. O., Anyanwu, B. O., & Ejileugha, C. (2023). Pharmaceuticals and personal care products as emerging contaminants: Need for combined treatment strategy. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100206>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., 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., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pawłowska, B. (2025). Effects of diclofenac, ibuprofen, ionic liquid and drug-IL mixtures on various environmental elements. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 25(4), 100671. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2025.100671>
- Pemberthy, P., 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>
- Peña-Guzmán, C., Ulloa-Sánchez, S., Mora, K., Helena-Bustos, R., Lopez-Barrera, E., Alvarez, J., & Rodriguez-Pinzón, M. (2019). Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *Journal of Environmental Management*, 237, 408-423. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
- Picinini-Zambelli, J., Hilario Garcia, A. L., & Da Silva, J. (2025). Emerging pollutants

- in the aquatic environments: A review of genotoxic impacts. *Mutation Research - Reviews in Mutation Research*, 795, 108519. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2024.108519>
- Rodrigues, S., Antunes, S. C., Correia, A. T., Golovko, O., Žlábek, V., & Nunes, B. (2019). Assessment of toxic effects of the antibiotic erythromycin on the marine fish gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) by a multi-biomarker approach. *Chemosphere*, 216, 234-247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.124>
- Serna-Galvis, E. A., Silva-Agredo, J., Botero-Coy, A. M., Moncayo-Lasso, A., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2019a). Effective elimination of fifteen relevant pharmaceuticals in hospital wastewater from Colombia by combination of a biological system with a sonochemical process. *The Science of the Total Environment*, 670, 623-632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.153>
- Serna-Galvis, E. A., Botero-Coy, A. M., Martínez-Pachón, D., Moncayo-Lasso, A., Ibáñez, M., Hernández, F., & Torres-Palma, R. A. (2019b). Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes. *Water Research*, 154, 349-360. <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. (2022a). An Initial Approach to the Presence of Pharmaceuticals in Wastewater from Hospitals in Colombia and Their Environmental Risk. *Water*, 14(6), 950. <https://doi.org/10.3390/w14060950>
- Serna-Galvis, E. A., Martínez-Mena, Y. L., Porras, J., Torres-Palma, R. A., Martínez-Mena, Y. L., Porras, J. y Torres-Palma, R. A. (2022b). 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/iyv.v24i1.11267>
- Solano Roa, M. V. y Garavito Cárdenas, G. (2013). Condición de venta de analgésicos antiinflamatorios no esteroides, legalmente autorizados para su comercialización en Colombia. Estrategias de uso racional. *Revista Colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas*, 42(2), 145-168. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-74182013000200001
- Souza, M. C. O., Rocha, B. A., Adeyemi, J. A., Nadal, M., Domingo, J. L., & Barbosa, F. (2022). Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples. *The Science of the Total Environment*, 848, 157774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157774>
- US EPA. (2022). *Fact Sheet: Fifth Contaminant Candidate List (CCL 5)*. <https://www.epa.gov/ccl/contaminant-candidate-list-5-ccl-5>
- Valladales-Restrepo, L. F., Rubio-Londoño, S., Poveda-Martinez, L. F., & Machado-Alba, J. E. (2022). Prescribing Pattern of Analgesics in Colombia. Are there

Differences between Capital Cities and Municipalities? A Cross-Sectional Study. *Drugs - Real World Outcomes*, 9(3), 487-501. <https://doi.org/10.1007/s40801-022-00318-2>

Wolf, L., Zwiener, C., & Zemmann, M. (2012). Tracking artificial sweeteners and pharmaceuticals introduced into urban groundwater by leaking sewer networks. *Science of The Total Environment*, 430,

8-19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.059>

Zapata, N. I., & Peñuela, G. A. (2021). Modified QuEChERS/UPLC-MS/MS method to monitor triclosan, ibuprofen, and diclofenac in fish *Pseudoplatystoma magdaleniatum*. *Food Analytical Methods*, 14(6), 1289-1304. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01951-9>

Material suplementario

Tabla 1.

Caracterización detallada de los estudios de PPCPs incluidos en la revisión sistemática