



Impacto de los contaminantes emergentes en el entorno acuático y los tratamientos para el control y remoción en los cuerpos hídricos. Revisión literaria

Impact of emerging pollutants in aquatic environment and treatments for control and removal in water bodies.

Harvey Andres Milquez Sanabria¹  Juan Camilo Montagut² 

¹Ingeniero Químico. Magister en Ingeniería – Ingeniería Química. Doctor en Ciencias – Energías Renovables. Líder del grupo de Investigación GPS. Universidad de América. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

²Ingeniero Químico. Especialista en Agua y Saneamiento Básico. Estudiante de Especialización en Gestión Ambiental.

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión del impacto ambiental generado por los contaminantes emergentes (CE) en el entorno acuático y la manera de tratarlos, al ser descargados en los cuerpos hídricos. Se presenta una visión global y una visión a nivel regional (Latinoamérica) de los contaminantes emergentes presentes en el agua bien sea agua residual doméstica, agua residual industrial o agua potable para de esta manera identificar cuáles son los principales contaminantes emergentes (CE) y mostrar la importancia y el impacto que tienen sobre el ambiente y las repercusiones debidas al desconocimiento y la falta de legislación al momento de controlar los vertimientos sobre los cuerpos hídricos. Las eficiencias de remoción para los contaminantes emergentes mediante tratamientos comunes (coagulación, floculación, sedimentación, etc.) son medianamente aceptables con valores entre un 30% y 60% mientras que a través de tratamientos terciarios (oxidación avanzada, tratamientos con peróxido de hidrogeno, luz UV, etc.) alcanza porcentajes entre un 80% y un 95% indicando la alta capacidad para remover los contaminantes.

Abstract

This paper aims to review of the environmental impact generated by emerging pollutants (EPs) in the aquatic environment and how to treat them, when they are discharged into water bodies. The paper presents a global vision and a regional vision (Latin America) of the emerging pollutants (EPs) that are present in the water, whether domestic wastewater, industrial wastewater or drinking water and in that way identify which are the main emerging pollutants (EPs) and show the importance and impact they have on the environment and the repercussions of ignorance and lack of legislation when controlling discharges on water bodies. The removal efficiencies for emerging contaminants through common treatments (coagulation, flocculation, sedimentation, etc.) is moderately acceptable with values between 30% and 60%, while through tertiary treatments (advanced oxidation, treatments with hydrogen peroxide, UV light, etc.) the removal efficiency achieves percentages between 80% and 95% indicating the high capacity to remove these pollutants.

Keywords:

Emerging pollutants, treatment, wastewater, drinking water, environmental impact

Palabras clave:

Deterioro ambiental, conservación de recursos, tratamientos terciarios, calidad del agua.

Cómo citar:

Impacto de los contaminantes emergentes en el entorno acuático y los tratamientos para el control y remoción en los cuerpos hídricos. Revisión literaria. *Ingeniería y Competitividad*, 2023, 25(3); e-30412551. doi: 10.25100/iyv.v25i3.12551

Recibido: 10-24-22

Aceptado 22-08-23

Correspondencia:

juan.montagut@estudiantes.
uamerica.edu.co
harvey.milquez@profesores.
uamerica.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.

Conflicto de intereses:

Ninguno declarado



OPEN  ACCESS

¿Por qué se realizó?

La investigación se realizó con el fin de contribuir al conocimiento sobre la problemática de los contaminantes emergentes en el agua residual, principalmente en Colombia. Proporciona una descripción general de la problemática, desde su definición, los impactos que puede tener en el ambiente y la salud humana, hasta la legislación que existe al respecto. Destaca la importancia de la investigación sobre tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales con la presencia de contaminantes emergentes. Esto se debe a que la legislación colombiana presenta algunos vacíos en este tema, lo que dificulta el control y tratamiento de estos contaminantes

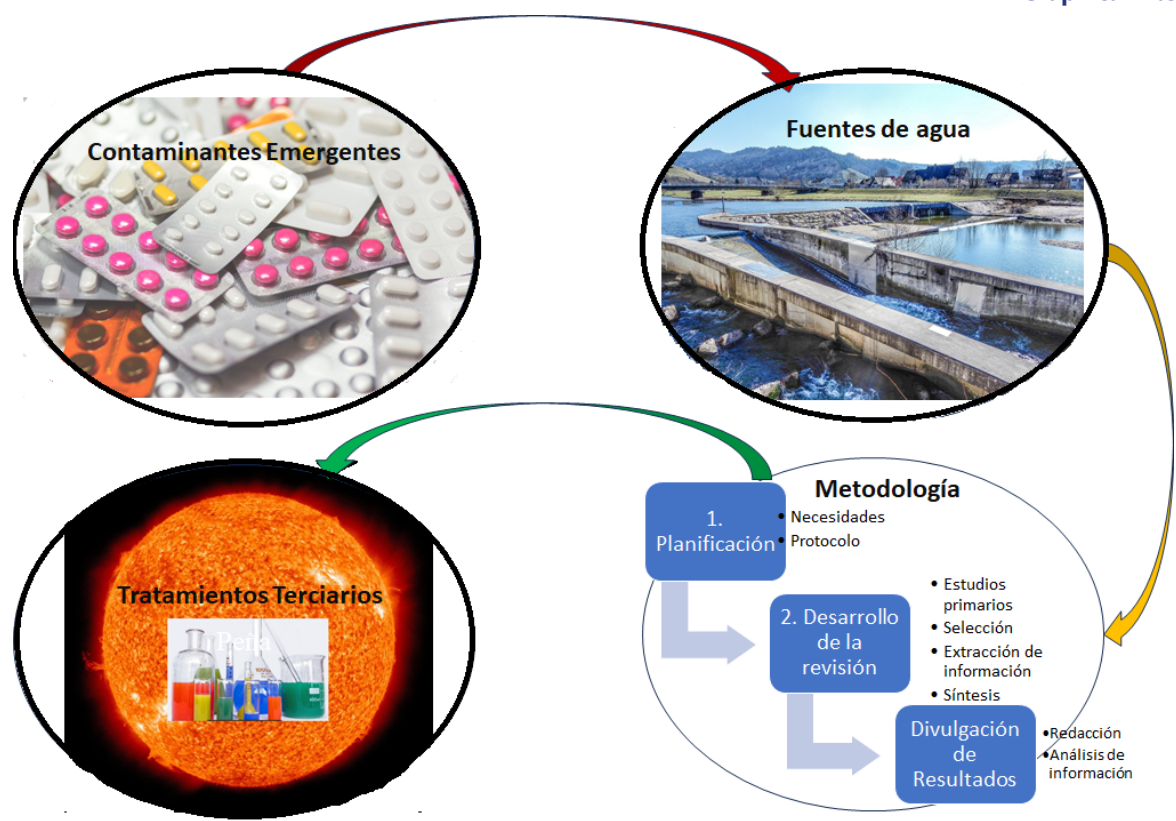
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los principales resultados identificados fueron la baja legislación actual en el país, relacionada con los contaminantes emergentes. De la misma manera se identificaron algunos estudios en Colombia relacionados con fuentes puntuales de contaminantes emergentes, y su relación con la afectación con fuentes hídricas. Finalmente se identificaron algunas tecnologías que han sido utilizadas a nivel laboratorio para el tratamiento y remoción de este tipo de contaminantes

¿Qué aportan estos resultados?

Son dos principalmente las líneas de trabajo que se generan a través de esta investigación, la primera esta relacionada con la identificación de fuentes puntuales de contaminantes emergentes, y su impacto ambiental. El segundo aporte son las tecnologías que se deben seguir investigando, tanto a nivel laboratorio, como a nivel planta piloto para la remoción de esta fuente de contaminación.

Graphical Abstract



Introducción

La población alrededor del mundo ha crecido rápidamente y según [\(1\)](#) un 54% de la población global (3.9 billones de personas aproximadamente) vivían en las áreas urbanas en 2014 y se proyecta que se expandan al 66% para el año 2050. El consumo de alimentos y bebidas genera, entre otros muchos residuos, descargas hacia los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial. Los sistemas de alcantarillado sanitario y/o pluvial cumplen la función de transportar el agua proveniente de la lluvia y de las descargas realizadas por los inodoros, también por los lavados de ropa, y por los lavados de cualquier otro tipo de recursos. A este tipo de agua se le denomina agua residual doméstica; también existen las descargas de agua realizadas por las actividades industriales como la producción de leche, cuero, y licores, a este tipo de descargas provenientes de procesos productivos se le denomina agua residual industrial.

En la actualidad, la humanidad genera graves problemas que afectan la salud pública y el medio ambiente por el hecho de producir gran cantidad de residuos líquidos procedentes de las actividades domésticas, de los procesos agrícolas y de los procesos industriales. El tratamiento y el manejo adecuado del agua residual y las excretas contribuyen a la correcta conservación de las condiciones físicas y químicas del agua lo que genera repercusiones positivas sobre la salud humana y del ambiente mismo [\(2\)](#). Los contaminantes emergentes, en adelante CE, son en su mayoría químicos derivados de la actividad humana que no son regulados y que se presentan en el aire, el suelo, el agua, la comida y los tejidos humanos y animales en pequeñas concentraciones [\(3\)](#), estos contaminantes son principalmente compuestos orgánicos conocidos como: productos farmacéuticos y de cuidado personal, hormonas, aditivos de comida, pesticidas, plásticos, preservativos de madera, detergentes de ropa, desinfectantes, surfactantes, retardantes de flama y otros compuestos orgánicos encontrados en el agua y generados por la actividad humana [\(4\)](#).

Por otra parte, en cuanto a la normativa legal que rige a los CE a nivel internacional la calidad del agua efluente de las plantas de tratamiento o el agua descargada hacia alguna fuente hídrica se encuentra regulada principalmente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA por sus siglas en inglés), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Directiva sobre Agua Potable (DWD por sus siglas en inglés) de la Unión Europea. Sin embargo, los tratamientos y el agua residual son propios de cada población donde es descargada (para el agua residual) o donde es tratada (para los tipos de tratamiento) por lo que la regulación ambiental será discriminada de acuerdo con el territorio donde se presenta. La legislación colombiana presenta algunos vacíos frente al tratamiento de los CE en el agua residual, el decreto 1575 de 2007, la Resolución 2115 de 2007, el decreto único 1077 del 2015 y la resolución 631 de 2015 son parte de la normativa colombiana que regula y gestiona los residuos en el territorio; sin embargo, frente a los CE no se incluyen aspectos relacionados con dichos contaminantes debido a que las normas en mención solo establecen criterios frente a los residuos peligrosos (RESPEL) y la descarga a los cuerpos hídricos sin dar una especificidad adecuada para la descarga de los CE [\(5\)](#). Los CE tienen un impacto negativo en el ambiente [\(6\)](#) y, por ende, en la salud humana. Pueden causar daños en los ecosistemas [\(7\)](#), contaminar el agua potable [\(8\)](#), y provocar problemas en la salud como: cáncer, defectos congénitos y trastornos en el desarrollo [\(9\)](#). El objetivo de esta investigación es identificar la problemática de los CE en el contexto mundial y nacional, y reconocer diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales con la presencia de estos contaminantes.

Metodología

La metodología utilizada para elaborar el presente documento se basó en la revisión bibliográfica sistemática en español e inglés, aplicando la metodología propuesta por (10), como se puede ver en la [figura 1](#). Las principales plataformas de búsqueda utilizadas fueron *Google Académico* y *Science Direct*. Se ajustó el periodo de búsqueda de 10 años, es decir, desde 2012 hasta 2022, dando prelación a los artículos más recientes, con una coincidencia de más de 66800 artículos, de los cuales se excluyeron aquellos vinculados a capítulos de libros, enciclopedias, reportes de caso, discusiones, editoriales, entre otros, debido a que se planteó únicamente analizar artículos de revisión y de investigación. Aun así, el número de coincidencias fue muy alto, por lo que se procedió a filtrar resultados únicamente por revistas en cuartil superior (Q1), y adicionar ecuaciones booleanas para obtener 202 artículos para el análisis inicial. Una vez que se encontraron los artículos científicos que contenían las palabras clave se procedieron a clasificar entre aquellos que brindaban información acerca de los tipos de CE y sus efectos ambientales, y los que brindaban información acerca de los tipos de tratamiento de agua residual con presencia de CE y sus eficiencias de remoción. Con los artículos ya clasificados se procedió a realizar la lectura de estos y se fueron identificando aquellos conceptos y aquella información que permitiera dar respuesta a cada uno de los objetivos plasmados en el presente documento.



Figura 1. Metodología utilizada para la revisión sistemática. Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Contexto general de los Contaminantes Emergentes (CE)

Para Khan et al., los CE involucran las sustancias de origen natural, químico o artificial presentes en la cotidianidad con un riesgo potencial hacia el ambiente pero que no son reguladas ni monitoreadas ambientalmente, entre los que se encuentran los fármacos, compuestos perfluorados y perclorados, hormonas, drogas de abuso, productos de cuidado e higiene personal y nanomateriales (11). De esta manera, se indica que los CE se encuentran presentes principalmente en los ambientes acuáticos y en el agua residual como nuevos contaminantes; por lo que de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA por sus siglas en inglés) son definidos como nuevos compuestos y derivados químicos sin estado de regulación y que su impacto en el ambiente y en la salud humana no se ha entendido completamente y su ocurrencia en los cuerpos de agua es y ha sido continuamente reportada a lo largo y ancho del planeta. Sin embargo, solo algunos de estos compuestos han sido evaluados en un nivel tóxico debido a su amplia numerosidad. Al involucrar la existencia en niveles de traza de los CE en el

ambiente las dificultades para tomar muestras precisas que los contengan, la interferencia en el efecto de la matriz ambiental, y los complejos procesos que requieren el análisis de estas trazas de contaminantes, son considerados como obstáculos para un estudio más detallado del impacto de los CE y debido a la complejidad de los métodos de análisis se convierten en procedimientos de alto costo [\(12\)](#), [\(4\)](#).

Es común encontrar diferentes tipos de CE dentro de los cuales los ftalatos se han usado por alrededor de 50 años y 3 millones de toneladas son producidas al año por todo el mundo; estos contaminantes están presentes en los productos de verano y son comúnmente usados en los plásticos para hacerlos flexibles, mejorar la resistencia al impacto y la resistencia al frío. Por otra parte, en los cosméticos son incluidos como agentes para incrementar el poder de penetración del producto en la piel. El más utilizado es el DEHP (di-2-etilhexilftalato) para las fragancias, los empaques de comida, bolsas de sangre y catéteres [\(13\)](#), [\(14\)](#). Por otro lado, los compuestos farmacéuticos son agrupados en diferentes clases: hormonas, antiinflamatorios, antiepilépticos, estatinas, antidepresivos, beta bloqueadores, antibióticos, entre otros, los cuales son utilizados de manera doméstica, veterinaria y en los hospitales; en su gran mayoría son excretados o metabolizados. Estos fármacos han sido estudiados y se ha encontrado presencia de drogas humanas en las aguas residuales urbanas, redes de alcantarillado de los hospitales y aguas superficiales [\(15\)](#), [\(16\)](#), [\(17\)](#).

Gong et al. brindaron una visión general del efecto de los CE polares orgánicos al aplicar muestras típicas pasivas en el agua y monitorear los factores ambientales como las condiciones hidrodinámicas, temperatura, pH, atracción y fuerza iónica, entre otros factores bajo los que tienen considerable repercusión en el agua [\(18\)](#). Chia et al., presentaron un resumen respecto a la incidencia de los desechos microplásticos sobre la salud y la seguridad alimentaria humana en vista de que los tratamientos convencionales del agua no son capaces de remover los CE en muy bajas concentraciones [\(19\)](#). La presencia de los CE en los entornos acuáticos es común en un nivel internacional; sin embargo, es posible definir que los CE tienen ocurrencia en concentraciones considerables para aquellos países donde existe una alta actividad industrial o con poblaciones numerosas y es así como Peng et al., mostraron a través de sus análisis 44 tipos de CE en el área delta del río Yangtze en China donde la mayoría de estos involucraban químicos industriales como 1H – benzotriazol y retardantes de flama organofosforados [\(20\)](#). Por otra parte, dentro del estudio y el monitoreo realizado en el río Danubio por Ginebreda et al., se encontraron que 22 de los 235 CE monitoreados estaban presentes en los 55 sitios de muestreo y 125 se encontraron en al menos el 50% [\(21\)](#). Dentro del estudio realizado por de Sousa et al 2018, se encontraron siete contaminantes farmacéuticos de uso humano, tres hormonas esteroides y un contaminante de productos de uso personal en la superficie del agua, material particulado suspendido y en sedimentos del arroyo Piraí y el Río Jundiaí (Brasil) [\(22\)](#). En el conjunto de los químicos disruptivos endocrinos (EDCs por sus siglas en inglés) estudiados por Santos et al., el nonilfenol fue el compuesto con mayor presencia en los sedimentos marinos de las vecindades del desagüe del alcantarillado submarino a lo largo de la Costa de Sao Paulo (Brasil) y la diversidad de los EDCs se veía incrementada a medida que se observaba un aumento en la población que aprovecha el alcantarillado de la costa en mención [\(23\)](#).

Los CE se encuentran en pequeñas trazas en el ambiente pero su impacto sobre el medio natural ha generado interés en la sociedad, y a pesar de que su estudio se ha venido incrementando durante las tres décadas pasadas se dispone de poca información referente a: su efecto en la biota y en la salud humana, al impacto ambiental generado en el entorno acuático, a la potencial bioacumulación en el ambiente que conducen a

provocar efectos crónicos en la biota acuática, a la salud animal y humana y al ambiente en una exposición a largo plazo [\(24\)](#).

Contaminantes Emergentes (CE) en América Latina

En América Latina se ha evidenciado un incremento de investigaciones relacionadas con los CE en los entornos acuáticos identificando estudios pioneros en esta área a principios del siglo XXI donde se realizó un monitoreo de los contaminantes farmacéuticos y sus metabolitos en los recursos hídricos que comprendían agua residual tratada, agua residual sin tratar y agua natural en Rio de Janeiro en Brasil. A pesar de que se encontraron trazas de CE en Brasil, Chile, Argentina y Colombia en entornos acuáticos y especies que consumen su alimento de estos cuerpos, los estudios pusieron en evidencia que no se encuentra suficiente información y no hay suficiente conocimiento de cómo los CE se comportan en los entornos acuáticos en Latinoamérica [\(25\)](#). Además, la falta de regulación de los CE en Latinoamérica permite que estos contaminantes se descarguen de manera acelerada en los cuerpos de agua lo que representa un riesgo importante para el impacto en el ambiente y en la salud pública. Adicionalmente, las limitaciones en la información no permiten establecer las tendencias de los CE ni tampoco establecer relaciones de los compuestos utilizados en su mayoría en esta región geográfica [\(26\)](#), [\(27\)](#).

Los CE han sido estudiados y caracterizados ampliamente a nivel internacional para mejorar su entendimiento en cuanto a los impactos tóxicos y ambientales y su peso sobre los sistemas ecosistémicos. América latina ha sido foco de estudio durante los últimos diez años en materia del impacto ambiental de estos contaminantes para efectos del agua potable y el saneamiento básico; los CE mayormente estudiados y encontrados en las fuentes hídricas y en las aguas residuales en países latinoamericanos son los contaminantes farmacéuticos, seguidos por los productos de cuidado personal (Ftalatos) siendo el 17β – estradiol, el bisfenol A y la estrona los más reportados [\(6\)](#). Sin embargo, aunque los CE han venido requiriendo de estudios continuos para establecer su impacto ambiental y antrópico, no solo a nivel latinoamericano, sino a nivel internacional, los procesos para el tratamiento de las aguas residuales que contienen estos contaminantes son muy limitados [\(3\)](#). A pesar de que el tratamiento de aguas residuales es un tema de extrema importancia y de continua evolución en las técnicas de tratado, en zonas del Pacífico y el Caribe colombiano las industrias vierten sus residuos al mar y a los ríos circundantes, por lo que se recomienda mejorar la infraestructura, aumentar el personal capacitado de plantas de tratamiento y garantizar el cumplimiento de las normas en materia ambiental.

Ángel-Ospina y Machuca-Martínez, presentan una revisión sistemática de la tecnología de ozonización catalítica como un sistema prometedor para la descomposición de los radicales libres de los CE. Entre los principales resultados presentan que es una tecnología que a nivel laboratorio funciona bien, pero se necesitan mayores investigaciones para llevarla a escala piloto e industrial. Sin embargo, también es importante identificar que existe una generación de subproductos, lo que requiere etapas adicionales para aumentar la eficiencia de la remoción de CE [\(28\)](#).

De la misma manera, buscando alternativas para la remoción de CE se han planteado proyectos en los cuales el objetivo es el desarrollo y aplicación de tecnologías, como son la fotocatalisis heterogénea acoplada a un proceso aerobio para la remoción de Clorpirifos [\(29\)](#); el uso de biochar de derivado de cascara de cacao para la eliminación de ibuprofeno [\(30\)](#); carbón activado para la eliminación de amoxicilina [\(31\)](#); y reactores fotocatalíticos heterogéneos con TiO₂ para la eliminación de Albendazol [\(32\)](#).

Para el año 2019, Peña Guzmán et al., desarrollaron una revisión de literatura donde tomaron cincuenta y nueve artículos científicos y textos académicos de Latinoamérica con cincuenta y siete publicaciones de revistas y dos tesis doctorales entre el año 1999 y el año 2018 en las que se realizaban estudios en once diferentes países de Latinoamérica y de los cuales se encontró que los CE mayormente estudiados fueron los químicos farmacéuticos y los químicos provenientes de los productos de cuidado personal y dentro de ellos, los que tuvieron mayores reportes fueron el 17 β – estradiol, el Bisfenol A y la estrona que se presentaban en su mayoría en los efluentes de las plantas de tratamiento de agua residual. En Colombia se encontraron trazas con altas concentraciones en el agua residual de Clindamicina, Benzofenona, Acetaminofén, 3-benzofenona y galaxida (6). De igual manera, para ese mismo año, Reichert et al., 2019, desarrollaron una revisión de literatura de casos de estudio y artículos que incluían la determinación y la ocurrencia de CE en el ambiente acuático de Latinoamérica siendo discriminados en los siguientes temas: 1. Agua potable y fuentes, 2. Sistemas de tratamiento de agua residual, 3. Ecosistemas de agua dulce y agua superficial y sedimentos, 4. Agua subterránea, 5. Agua de Costas y 6. Suelo y Biota.; los autores encontraron que la mayoría de estudios ha sido realizada en áreas específicas de Brasil y México y el monitoreo de CE para los sistemas de tratamiento de agua residual es poco como para determinar las concentraciones considerables de CE por lo que es necesario realizar el respectivo monitoreo, no solo en estos sistemas sino también en el suelo, el agua subterránea y las áreas costeras. En la figura 2 puede visualizarse la distribución de los contaminantes y la investigación realizada por los autores (33).

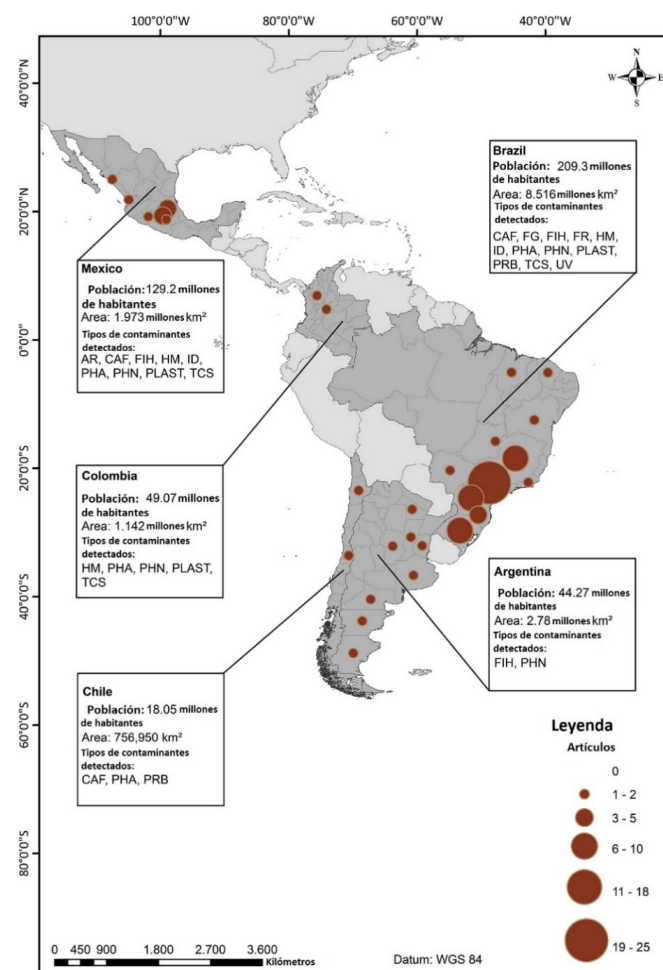


Figura 2. Distribución de los artículos publicados acorde a los contaminantes emergentes (CE) en Latinoamérica. Traducido del inglés al español y Tomado de:(33)

Impacto de los Contaminantes Emergentes (CE)

De acuerdo con Chaturvedi et al (34) y Yadav et al (35) los mayores impactos perjudiciales de los CE incluyen una reducción de la diversidad de los macroinvertebrados en los ríos, efectos dañinos sobre la población de peces y efectos cancerígenos en la salud humana. Muchos de los CE persisten en el ambiente acuático lo que genera un continuo riesgo para los organismos acuáticos, incluso si estos contaminantes se encuentran en concentraciones bajas en una exposición a largo plazo (20), un ejemplo de esto se evidencia en que la familia de los macroinvertebrados acuáticos ha sido reducida alrededor de un 30% debido a los pesticidas (36). Los químicos endocrinos disruptivos tienen la capacidad de realizar una interferencia química con la fisiología animal por lo que son capaces de mimetizar o bloquear la función de las hormonas endógenas, tienen una amplia variedad de estructuras y son bioactivos en concentraciones muy bajas correspondiendo a un efecto en el desarrollo embrionario y la diferenciación sexual (37), (23), (38) y así como los químicos endocrinos disruptivos, los químicos farmacéuticos son diseñados para ser moléculas activas biológicamente y sus efectos ambientales sobre la fauna acuática corresponden a interrupciones físicas en organismos para los cuales no van dirigidos (23). La mayoría de CE causan resistencias a los procesos fisiológicos de los animales y pueden acumularse en la biota acuática, los químicos farmacéuticos tienen efectos de feminización de los peces debido a los estrógenos o la alteración en el comportamiento de los animales por la presencia de antidepresivos en las corrientes de los ríos que sirven de receptores a los efluentes del agua que contiene CE (39) y la presencia de químicos provenientes de los productos de cuidado personal y productos para la belleza como los ftalatos, los parabenos, los protectores solares y los biocidas están relacionados con alergias, obesidad, neurotoxicidad, cáncer, endometriosis, disminución en la calidad del semen y problemas de nacimiento en los seres humanos (13), (40), (41), (42).

Por lo anterior, es posible evidenciar un alto impacto de los CE si se presentan en una exposición continuada por largos periodos de tiempo, no solo en países del continente europeo o asiático, sino también, y aunque los estudios son relativamente escasos, en países del continente americano, para motivos de este estudio, Latinoamérica. Lo anterior conlleva a determinar que existe una amplia y difusa distribución de los CE como contaminantes del agua residual y del entorno acuático y esto constituye una potencial amenaza para el ambiente y la salud humana debido al agua y la comida que consumimos; las economías en proceso de crecimiento como las de Latinoamérica representan las áreas geográficas más susceptibles al incremento de la contaminación por estos contaminantes y en particular de sus entornos acuáticos.

Partiendo de lo evidenciado, Rout et al., presentaron los efectos adversos de los CE tal como se evidencia en la [tabla 1 \(3\)](#).

Tabla 1. Principales funciones y efectos ambientales adversos de los CE. Traducido del inglés al español y Tomado de: Rout et al (3)

Contaminantes emergentes	Función	Efectos adversos
Antibióticos (claritromicina, penicilina, sulfonamidas, roxitromicina, tetraciclina)	Sustancias antimicrobiales que detienen la infección matando o inhibiendo el crecimiento de las bacterias	Induce a la Resistencia antibiótica en las cadenas microbiales, altera la estructura de la comunidad microbial, y causa la disminución de las algas, bacterias, nemátodos, etc.
Fragancias (galaxolida, mezclas de xileno, mezclas de cetona)	Usado como ingrediente de las fragancias en un amplio rango de productos de consumo humano incluyendo perfumes, cosméticos, shampoo, etc.	Tóxico para los organismos acuáticos, causa estrés de oxidación en los peces dorados, es carcinogénico para los roedores, puede causar daños en el sistema nervioso humano.
Preservativos (metilparabeno, 2-fenoxietanol)	Previene la descomposición microbiana y son usados en los cosméticos, artículos de aseo, etc., como ingredientes de preservativos	Responsables de las actividades de estrógenos débiles.
Retardantes de fuego (difenil éter polibromado o (PBDEs por sus siglas en inglés))	Usados como retardantes de flama en pinturas, plásticos, televisores, materiales de construcción, etc., para hacerlos difíciles de quemarse.	Afecta el cerebro y el Sistema nervioso, la actividad hormonal, la reproducción y la fertilidad.
Químicos Disruptivos endocrinos (ftalatos, bisfenol)	Grupo de químicos usados como plásticos, plastificantes, solventes/lubricantes industriales, etc.	Interfiere con el Sistema endocrino, los efectos de estrógenos en las ratas, efectos de feminización en los hombres, defectos de nacimiento y retrasos en el desarrollo.
Drogas antiinflamatorias sin esteroides (diclofenaco, ibuprofeno)	Reduce el dolor, fiebre e inflamación.	Incrementa el riesgo de las úlceras gastrointestinales, enfermedades del riñón, alteraciones en las branquias de la trucha arcoíris.
Reguladores Lipídicos (ácido clofíbrico, gemfibrozil)	Regulación de los niveles de triglicéridos y el colesterol en sangre.	Inhibición de la bioluminiscencia, inhibición de microalgas.
Beta-blockers (atenolol, metoprolol)	Manejar los ritmos anormales en el corazón inhibiendo la hormona de la adrenalina y la noradrenalina.	Afecta la reproducción y el crecimiento de los peces, inhibición en los receptores de descarga de las branquias, impacto en los ciclos de respiración y los ritmos de actividad de las truchas.
Anticonvulsivos (carbamazepina)	Trata los desórdenes de personalidad y los problemas epilépticos	Estrés de oxidación en la trucha arcoíris, afecta el Sistema nervioso central.
Hormonas (estrón, testosterona)	Regulación del metabolismo, homeostasis, control del Desarrollo sexual.	Afectan la reproducción y la fertilidad, masculinización de hembras, feminización de los machos, reduce la fertilidad en los peces.
Hidrocarburos poliaromáticos (antraceno, pireno).	Usado en la manufactura de plásticos, pesticidas, tintes, etc.	Efectos cancerígenos, enfermedades cardiovasculares, desarrollo pobre en los fetos.
Sustancias alquiladas perfluorados (ácido perfluorooctanoico)	Usado en la polimerización en las emulsiones, pulimentos, pinturas y recubrimientos.	Enfermedades tiroideas, daño del hígado, cáncer de riñón, reducción en la respuesta a las vacunas, efectos negativos en los niños no nacidos.
Nanomateriales (nanopartículas, nanocompuestos)	Usados en variedad de procesos de producción y de cuidado de la salud.	Afecta el Sistema respiratorio, la vida salvaje y causa daños ambientales.
Microbios (<i>Yersinia pestis</i> , <i>Vibrio cholerae</i>)	Implicaciones significantes en la biorremediación y la patogénesis.	Afecta el sistema gastrointestinal, el sistema inmune, tóxicos para el ambiente y la vida salvaje.

Sistemas de tratamiento de agua residual para los contaminantes emergentes (CE)

Las plantas de tratamiento de agua residual diseñadas para el agua residual regular proveniente de los alcantarillados sanitarios o de las corrientes con carga orgánica específica no están proyectadas para manejar químicos farmacéuticos complejos debido a que buscan objetivos de remoción y eliminación de carbono biodegradable, fósforo, sustancias con nitrógeno y microbios en ordenes de los $\mu\text{g/L}$ (42). Por otra parte, hay estudios que reportan una baja efectividad de remoción de los CE por tratamientos tradicionales de agua residual como sedimentación, floculación y lodos activados (17), (12), (43). Se ha detectado que muchos compuestos persisten sin alteración alguna aún después de aplicar tratamientos terciarios (44), (45).

En algunas ocasiones se encuentran hormonas que deben ser tratadas dentro de las plantas de tratamiento por lo que para la remoción de estos CE se presentan diferentes técnicas de tratamiento categorizadas bajo cuatro procedimientos que son la degradación abiótica (46), la degeneración biológica (47), la volatilización (48) y la adsorción en sólidos (49). Dentro de los procesos de tratamiento de agua residual se encuentran los tratamientos de degradación biológica y química y procesos de fotólisis que pueden transformar a los CE en formas mucho más tóxicas que su compuesto original.

Sin embargo, a pesar de la falta de eficiencia de remoción de CE que muestran los autores mencionados anteriormente por el uso de tratamientos convencionales de agua residual, existen otros autores como Rout et al., que indican que la efectividad de remoción de los CE depende de la persistencia de los contaminantes, sus características fisicoquímicas, las tecnologías de tratamiento empleadas y las condiciones ambientales y de operación, por lo tanto, en el tratamiento primario se remueven los sólidos suspendidos y los coloides pero los CE son también removidos principalmente por sorción en el lodo primario. En el tratamiento secundario se remueven contaminantes orgánicos del agua o nutrientes mediante degradación biológica y aquí los CE se someten a procesos de remoción de biodegradación y de sorción, para el tratamiento terciario que comprende la remoción de nutrientes, sólidos suspendidos y patógenos, los CE tienen una remoción significativa vía ozonización o por procesos de oxidación convencional (3), (50) donde la remoción de los CE en los tres tratamientos (primario, secundario y terciario) se muestra en la figura 3.

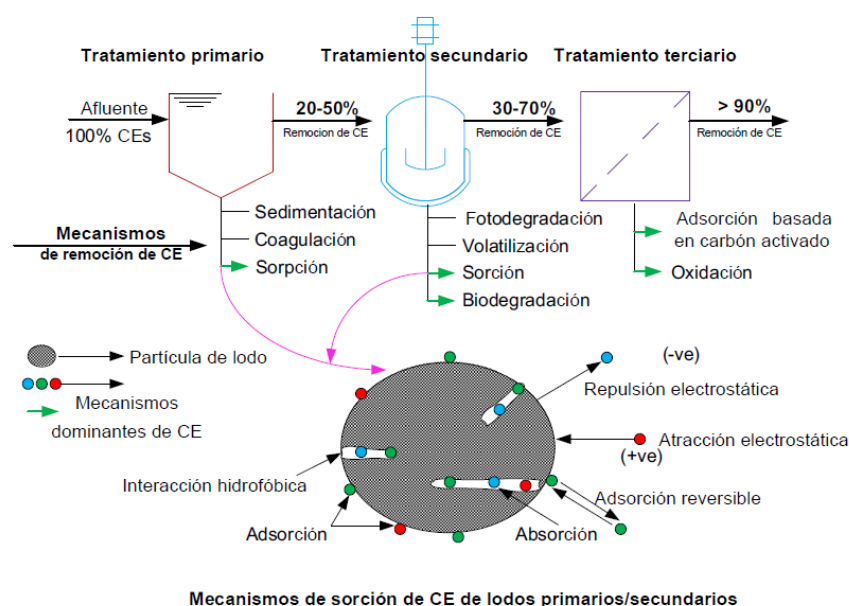


Figura 3. Esquema de remoción de CE en un tratamiento convencional de agua residual.
Traducido del inglés al español y Tomado de (3)

Tabla 2. Eficiencias de remoción de algunos de los contaminantes emergentes presentes en el agua residual. Fuente: Elaboración propia

Tipo de tratamiento	Proceso	Compuesto Objetivo	Eficiencia de remoción	Referencia
Reactor Batch en secuencia	Agua residual	Compuestos Farmacéuticos	Ibuprofeno: 63%-90%	(51)
Adsorción con carbón activado	Agua residual	Compuesto Farmacéuticos	Bisfenol-A: 50%-100%, Diclofenaco: 80%-100%, Carbamazepina: 50%-100%, Sulfametoxazol: 40%-100%	(52)
Humedales artificiales	Agua residual doméstica	Antibióticos	Sulfametoxazol: 94%-98%, Sulfadiazina: 61%, Sulfapiridina: 64%, Sulfatiazol: 75%, Ciprofloxacina: 77% aproximadamente, Ofloxacina: 98% aproximadamente, Ácido Pipemidico: 80%-99%, Ampicilina: 49%-55%, Acitromicina: 0%-53%, Claritromicina: 58%-65%, Metronidazol: 82%-99%, Timethoprim: mayor al 89% hasta el 93%	(53)
Humedales artificiales	Aguas grises	Compuestos Farmacéuticos	Timethoprim: 0%-50%, Detergentes aniónicos: 98.4%-99%, Detergentes sin iones: 66.3%-91-7%	(54)
Oxidación avanzada (óxido de manganeso recubierto de fibra de coco)	Agua residual de hospital	Compuestos Farmacéuticos	1,3-Dimetilurato: 100%; Androstanodiona: 100%; anileridina: 100%; Ácido atenolol: 100%; Azitromicina: 100%; Benadril: 42%; Benzedrex: 100%; bupivacaína: 67%; Cafeína: 45%; Catina: 100%; Celecoxib: 46%; cloroxilenol: 96%; Ciprofloxacino: 100%; Clindamicina: 100%; Clorofeno: 98%; Cumarina: 65%; Efedrina: 22%; Escitalopram: 100%; Etilefrina: 100%; fexofenadina: 100%; fluconazol: 35%; Gabapentina: 97%; Glucosamina: 72%; Hexestrol: 54%; Irbesartán: 100%; Isosorbida: 100%; Ketamina: 71%; Lamotrigina: 99%; Levocetirizina: 71%; Levomentol: 100%; Lidocaína: 31%; Mequinol: 100%; Metformina: 70%; Metadona: 100%; Metotrexato: 97%; midazolam: 100%; Morfina-3-glucurónido: 100 %; Micofenolato: 60%; Nevirapina: 75%; Éteres monoalquílicos de polialquilenglicol: 100%; Prasterona: 100%; Propofol: 94%; Rifaximina: 87%; Ropivacaína: 100%; Safranina: 91%; cipionato de testosterona: 100%; propionato de testosterona: 87%; tiopental: 0%; Triclosán: 98%; ácido valproico: 59%; venlafaxina: 65%; Voriconazol: 36%	(55)
Peróxido de Hidrógeno en condiciones supercríticas	Agua residual de Hospital	Compuestos Farmacéuticos	Warfarina: 72%; paracetamol: 99,99%; Carbamazepina: 84%; Ciprofloxacino: 97,5%; Ciclofosfamida: 83%; Ampicilina: 87,5%; naproxeno: 73%; diclofenaco: 81%; Fosfato de tris(2-butoxietilo): 92%	(56)
Persulfato activado por luz solar	Agua residual de agricultura	Pesticidas	Acetamiprid: 48,8-99%; acrinatrina: 95-99%; Clorantraniliprol: 50,8-98,8%; Ciflufenamida: 59,3-99%; Cimoxanilo: >99%; difenoconazol: 64,8-99%; Flonicamid: 16,3-58,9%; fluopiram: 31,3-99%; Folpet: 48,5-99%; Hexitiazox: 84,4-99%; imidacloprid: 65,9-99%; Pimetrozina: 98,2-99%; Spinosad A: >99%; Spinosad D: >99%; Spiromesifen: 92-99%; Tebuconazol: 65,7-99%; Tiacloprida: 58,7-99%; Triadimenol: 58,7-99%	(57)
Sistema de aireación, contactor biológico de rotación, humedal artificial y estanque de estabilización de desechos	Agua residual	Compuestos farmacéuticos, Compuestos de protector solar, fragancias, antisépticos, retardantes de llama, surfactantes, pesticidas	Humedal artificial: 42%, Sistema de Aireación: 62%, Contactor biológico de rotación: 63%, Estanque de Estabilización de desechos: 82%	(58)
Ozonización	Agua residual	Cafeína, Productos farmacéuticos y de cuidado personal, químicos disruptivos endocrinos	Se removió cerca del 80% de los compuestos objetivo	(59)

La [tabla 2](#) presenta las eficiencias de remoción de los tratamientos utilizados para eliminar los CE provenientes del agua residual de diferentes tipos de actividades antrópicas las cuales fueron investigadas u obtenidas por diferentes autores que realizaron un análisis bibliográfico o realizaron experimentación referente al tema de la presencia de CE en el agua residual y los tipos de tratamientos para removerlos. La [tabla 2](#) permite identificar la existencia de diferentes tipos de CE en el agua residual con mayor presencia de contaminantes farmacológicos por lo que de las referencias bibliográficas investigadas se percibe que el agua residual doméstica e industrial proveniente de la actividad antrópica contiene en su gran mayoría partículas residuales de la medicación ingerida por la actividad humana. Por otra parte, la remoción de dichos contaminantes se presenta en altos porcentajes para los tratamientos terciarios como aquellos que utilizan peróxido de hidrógeno, oxidación avanzada, carbón activado, etc., indicando que para eliminar en concentraciones considerables los CE es necesario el uso de tratamientos más complejos, sin embargo, los autores referenciados en la [tabla 2](#) también proporcionan información de eficiencias de remoción al momento de utilizar combinación de tratamientos convencionales y tratamientos terciarios lo que permite inferir que la versatilidad y la veleidad en el uso de los tratamientos de remoción debe abarcar la mayor cantidad de CE para alcanzar los mejores porcentajes de remoción.

Conclusiones

El impacto ambiental generado por los CE sobre los cuerpos hídricos y sobre el ambiente en general ha sido estudiado durante los últimos quince años de manera creciente debido a que urge la necesidad de identificar los peligros crónicos de estos contaminantes bajo una exposición inadecuada a largo plazo; dentro de dichos estudios se identifica que la exposición prolongada y bajo pequeñas concentraciones a los CE causa un impacto negativo sobre la biota acuática debido a que el agua residual doméstica e industrial a nivel regional e internacional es tratada por métodos convencionales (floculación, coagulación, sedimentación, etc.) que, aunque logran una remoción considerable, no permiten la eliminación adecuada de los CE (con valores entre un 30% y 60%). Además, la ausencia de claridad en la normativa ambiental que rige a los CE tanto a nivel regional como a nivel internacional no permite identificar concentraciones específicas máximas de dichos contaminantes y se dificulta precisar un valor límite permisible a la hora de descargar el agua residual a los cuerpos de agua.

Los CE pueden ser tratados a través de mecanismos convencionales que abarcan tecnologías de sedimentación, coagulación, floculación, biorreacción, entre otras muchas, sin embargo, a partir de la literatura investigada se pudo evidenciar que los tratamientos más efectivos para la remoción de estos contaminantes son los que implican involucrar tratamientos terciarios o que requieren directamente de oxidaciones avanzadas o de interacciones químicas más complejas, esto principalmente debido a que, los CE comprenden compuestos químicos de compleja degradación bajo condiciones normales. La investigación realizada pudo determinar que, bajo tratamientos de carácter terciario como oxidaciones avanzadas, osmosis inversa, entre otros, la remoción de los CE puede lograr un porcentaje de remoción del 90% o mayor, lo que permite identificar que la capacidad para remover los contaminantes implica una interacción entre partículas más específica y complicada. Por otra parte, los tratamientos primarios y secundarios como coagulación, floculación, sedimentación, entre otras, logran un porcentaje de remoción entre un 30% y un 70% que permite deducir que al momento de realizar tratamientos de este tipo para los CE se debe recurrir a un tratamiento posterior para lograr porcentajes más altos de eliminación de estos contaminantes; lo anterior indica que la mejor manera

de remover los CE es utilizar una combinación de tratamientos terciarios y tratamientos convencionales que permitan remover hasta un 99% de los contaminantes. Por lo tanto, la versatilidad en el uso de los tratamientos de remoción para CE y en las combinaciones de estos permite lograr altas eficiencias de remoción debido a que se abarca la mayor cantidad de CE en el agua.

Es necesario desarrollar métodos de medición más rápidos y sencillos para la detección confiable de CE, con la finalidad de ser llevados a sitios de disposición de vertimientos. De la misma manera, se necesita tener leyes claras relacionadas con los límites máximos de los CE, lo cual requiere de estudios toxicológicos para identificar la influencia de estos contaminantes en la biota y el ser humano. Se debe avanzar en los estudios y diseños de sistemas complejos de tratamiento de aguas residuales con CE, así como pasar las investigaciones a escala piloto e industrial.

Referencias bibliográficas

1. Van Dijk M, Morley T, Rau ML, Saghai Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050. *Nat Food*. 2021;2(7):494-501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>
2. Botello YMR, Cabrera JAB, Hidalgo RMA, Reyes AS, Toledo DRG. Dimensionamiento de un biodigestor para el tratamiento de excretas de cerdos: e317. *Rev Cuba Ing*. 2022;13(1).
3. Rout PR, Zhang TC, Bhunia P, Surampalli RY. Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: A review. *Sci Total Environ*. 2021;753:141990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141990>
4. Tang Y, Yin M, Yang W, Li H, Zhong Y, Mo L, et al. Emerging pollutants in water environment: Occurrence, monitoring, fate, and risk assessment. *Water Environ Res* [Internet]. 2019 Oct 1;91(10):984-91. Available from: <https://doi.org/10.1002/wer.1163><https://doi.org/10.1002/wer.1163>
5. Flórez JA, Méndez DM, Núñez SB, Montes GE, Negrete JM. Productos farmacéuticos y de cuidado personal presentes en aguas superficiales, de consumo humano y residuales en el departamento de Córdoba, Colombia. *Rev Investig Agrar y Ambient*. 2021;12(2):179-97. <https://doi.org/10.22490/21456453.4231>
6. Peña-Guzmán C, Ulloa-Sánchez S, Mora K, Helena-Bustos R, Lopez-Barrera E, Alvarez J, et al. Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *J Environ Manage*. 2019;237:408-23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
7. Vasilachi IC, Asiminicesei DM, Fertu DI, Gavrilescu M. Occurrence and fate of emerging pollutants in water environment and options for their removal. *Water*. 2021;13(2):181 <https://doi.org/10.3390/w13020181>
8. Hube S, Wu B. Mitigation of emerging pollutants and pathogens in decentralized wastewater treatment processes: A review. *Sci Total Environ*. 2021;779:146545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146545>
9. Kumar M, Borah P, Devi P. Priority and emerging pollutants in water. In: *Inorganic Pollutants in Water*. Elsevier; 2020. p. 33-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00003-2>
10. Kitchenham B. Procedures for performing systematic reviews. Keele, UK, Keele Univ. 2004;33(2004):1-26.

11. Khan S, Naushad M, Govarathanan M, Iqbal J, Alfadul SM. Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research. *Environ Res.* 2022;207:112609. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112609>
12. Rath BS, Kumar PS, Show P-L. A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. *J Hazard Mater.* 2021;409:124413. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124413>
13. Elaiyaraja A, Mayilsamy M, Vimalkumar K, Nikhil NP, Noorani PM, Bommuraj V, et al. Aquatic and human health risk assessment of humanogenic emerging contaminants (HECs), phthalate esters from the Indian Rivers. *Chemosphere.* 2022;306:135624. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135624>
14. Carrizo JC, Duy SV, Munoz G, Marconi G, Amé MV, Sauvé S. Suspect screening of pharmaceuticals, illicit drugs, pesticides, and other emerging contaminants in Argentinean *Piaractus mesopotamicus*, a fish species used for local consumption and export. *Chemosphere.* 2022;309:136769. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136769>
15. Almazrouei B, Islayem D, Alskafi F, Catacutan MK, Amna R, Nasrat S, et al. Steroid hormones in wastewater: Sources, treatments, environmental risks, and regulations. *Emerg Contam.* 2023;9(2):100210. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100210>
16. Duré GM, Medina García L, Rodríguez Bonet S, Ferrreira F, Sezerino PH, López Arias T. Phytoremediation of pharmaceutical emerging contaminants in floating wetlands. *Reportes científicos la FACEN.* 2022;13(2):153-9. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2022.13.2.153>
17. Morin-Crini N, Lichtfouse E, Fourmentin M, Ribeiro ARL, Noutsopoulos C, Mapelli F, et al. Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments. A review. *Environ Chem Lett.* 2022;20(2):1333-75. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01379-5>
18. Gong X, Li K, Wu C, Wang L, Sun H. Passive sampling for monitoring polar organic pollutants in water by three typical samplers. *Trends Environ Anal Chem.* 2018;17:23-33. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2018.01.002>
19. Chia RW, Lee J-Y, Kim H, Jang J. Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. *Environ Chem Lett.* 2021;19(6):4211-24. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01297-6>
20. Peng Y, Fang W, Krauss M, Brack W, Wang Z, Li F, et al. Screening hundreds of emerging organic pollutants (EOPs) in surface water from the Yangtze River Delta (YRD): occurrence, distribution, ecological risk. *Environ Pollut.* 2018;241:484-93. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.061>
21. Ginebreda A, Sabater-Liesa L, Rico A, Focks A, Barceló D. Reconciling monitoring and modeling: An appraisal of river monitoring networks based on a spatial autocorrelation approach-emerging pollutants in the Danube River as a case study. *Sci Total Environ.* 2018;618:323-35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.020>
22. de Sousa DNR, Mozeto AA, Carneiro RL, Fadini PS. Spatio-temporal evaluation of emerging contaminants and their partitioning along a Brazilian watershed. *Environ Sci Pollut Res.* 2018;25:4607-20. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0767-7>
23. Santos MM, Ruivo R, Capitão A, Fonseca E, Castro LFC. Identifying the gaps: Resources and perspectives on the use of nuclear receptor based-assays to improve hazard assessment of emerging contaminants. *J Hazard Mater.* 2018;358:508-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.076>
24. Pesqueira JFJR, Pereira MFR, Silva AMT. Environmental impact assessment of advanced

urban wastewater treatment technologies for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern: a review. *J Clean Prod.* 2020;261:121078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121078>

25. Valdez-Carrillo M, Abrell L, Ramírez-Hernández J, Reyes-López JA, Carreón-Díazconti C. Pharmaceuticals as emerging contaminants in the aquatic environment of Latin America: a review. *Environ Sci Pollut Res.* 2020;27:44863-91. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10842-9>

26. Souza MCO, Rocha BA, Adeyemi JA, Nadal M, Domingo JL, Barbosa Jr F. Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples. *Sci Total Environ.* 2022;848:157774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157774>

27. Vargas-Berrones K, Bernal-Jácome L, de León-Martínez LD, Flores-Ramírez R. Emerging pollutants (EPs) in Latin América: A critical review of under-studied EPs, case of study-Nonylphenol. *Sci Total Environ.* 2020;726:138493. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138493>

28. Angel-Ospina AC, Machuca-Martínez F. Ozonización catalítica en el tratamiento de Contaminantes de Preocupación Emergente en aguas residuales: Un análisis bibliométrico. *Ing y Compet.* 2022;24(1). <https://doi.org/10.25100/iyv.24i1.11603>

29. Becerra D, Arteaga BL, Ochoa YE, Barajas-Solano AF, García-Martínez JB, Ramírez LF. Acople de fotocatalisis heterogénea y proceso biológico aerobio de lodos activados para tratar aguas residuales con contenido de Clorpirifos. *Ing Y Compet.* 2020;22(1):1-12. <https://doi.org/10.25100/iyv.22i1.8135>

30. Tejada-Tovar CN, Villabona-Ortíz A, Colpas-Castillo F, Sanmartín-Álvarez Z, Landázury-Galé D. Biochars derivados de cacao sintetizados a baja temperatura impregnados con cloruro de zinc para la eliminación de ibuprofeno en diferentes soluciones. *Ing y Competitividad.* 2022;24(1):NA-NA. <https://doi.org/10.25100/iyv.24i1.10941>

31. Tejada CN, Almanza D, Villabona A, Colpas F, Granados C. Caracterización de carbón activado sintetizado a baja temperatura a partir de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la adsorción de amoxicilina. *Ing Y Compet.* 2017;19(2):43-52. <https://doi.org/10.25100/iyv.19i2.5292>

32. Margarita-Guerra M, Arrieta-Pérez R, Colina-Marquez J. Modelado de un Reactor Solar Fotocatalítico Heterogéneo con Ti [O. sub. 2] para el Tratamiento de Agua Residual Contaminada con Albendazol. *Ing y Competitividad.* 2019;21(2):NA-NA.

33. Reichert G, Hilgert S, Fuchs S, Azevedo JCR. Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America. *Environ Pollut.* 2019;255:113140. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113140>

34. Chaturvedi P, Shukla P, Giri BS, Chowdhary P, Chandra R, Gupta P, et al. Prevalence and hazardous impact of pharmaceutical and personal care products and antibiotics in environment: A review on emerging contaminants. *Environ Res.* 2021;194:110664. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110664>

35. Yadav D, Rangabhashyam S, Verma P, Singh P, Devi P, Kumar P, et al. Environmental and health impacts of contaminants of emerging concerns: Recent treatment challenges and approaches. *Chemosphere.* 2021;272:129492. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129492>

36. deNoyelles F, Dewey SL, Huggins DG, Kettle WD. Aquatic mesocosms in ecological effects testing: detecting direct and indirect effects of pesticides. In: Aquatic mesocosm studies in ecological risk assessment. CRC Press; 2020. p. 577-603. <https://doi.org/10.1201/9781003070016-36>
37. Zhang J, Zhang C, Du Z, Zhu L, Wang J, Wang J, et al. Emerging contaminant 1, 3, 6, 8-tetrabromocarbazole induces oxidative damage and apoptosis during the embryonic development of zebrafish (*Danio rerio*). *Sci Total Environ*. 2020;743:140753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140753>
38. Wang C, Chen H, Li H, Yu J, Wang X, Liu Y. Review of emerging contaminant tris (1, 3-dichloro-2-propyl) phosphate: Environmental occurrence, exposure, and risks to organisms and human health. *Environ Int*. 2020;143:105946. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105946>
39. Baralla E, Demontis MP, Dessì F, Varoni M V. An overview of antibiotics as emerging contaminants: Occurrence in bivalves as biomonitoring organisms. *Animals*. 2021;11(11):3239. <https://doi.org/10.3390/ani11113239>
40. Baines C, Lerebours A, Thomas F, Fort J, Kreitsberg R, Gentes S, et al. Linking pollution and cancer in aquatic environments: A review. *Environ Int*. 2021;149:106391. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106391>
41. Song X, Zhuo Q, Tang S, Xie T, Chen Z, Zang Z, et al. Concentrations of phthalates metabolites in blood and semen and the potential effects on semen concentration and motility among residents of the Pearl River Delta region in China. *Emerg Contam*. 2020;6:39-43. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.12.002>
42. Morin-Crini N, Lichtfouse E, Liu G, Balaram V, Ribeiro ARL, Lu Z, et al. Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. *Environ Chem Lett*. 2022;20(4):2311-38. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
43. Rathi BS, Kumar PS. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environ Pollut*. 2021;280:116995. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>
44. Lopez FJ, Pitarch E, Botero-Coy AM, Fabregat-Safont D, Ibáñez M, Marin JM, et al. Removal efficiency for emerging contaminants in a WWTP from Madrid (Spain) after secondary and tertiary treatment and environmental impact on the Manzanares River. *Sci Total Environ*. 2022;812:152567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152567>
45. Arvaniti OS, Dasenaki ME, Asimakopoulos AG, Maragou NC, Samaras VG, Antoniou K, et al. Effectiveness of tertiary treatment processes in removing different classes of emerging contaminants from domestic wastewater. *Front Environ Sci Eng*. 2022;16(11):148. <https://doi.org/10.1007/s11783-022-1583-y>
46. Koch N, Islam NF, Sonowal S, Prasad R, Sarma H. Environmental antibiotics and resistance genes as emerging contaminants: methods of detection and bioremediation. *Curr Res Microb Sci*. 2021;2:100027. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100027>
47. Samal K, Mahapatra S, Ali MH. Pharmaceutical wastewater as Emerging Contaminants (EC): Treatment technologies, impact on environment and human health. *Energy Nexus*. 2022;6:100076. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100076>
48. Ahmed SF, Mofijur M, Nuzhat S, Chowdhury AT, Rafa N, Uddin MA, et al. Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *J Hazard Mater*. 2021;416:125912 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>

49. Parida VK, Saidulu D, Majumder A, Srivastava A, Gupta B, Gupta AK. Emerging contaminants in wastewater: A critical review on occurrence, existing legislations, risk assessment, and sustainable treatment alternatives. *J Environ Chem Eng.* 2021;9(5):105966. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105966>
50. Mecha AC, Chollom MN. Photocatalytic ozonation of wastewater: a review. *Environ Chem Lett.* 2020;18:1491-507. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01020-x>
51. Hasan HA, Abdullah SRS, Al-Attabi AWN, Nash DAH, Anuar N, Rahman NA, et al. Removal of ibuprofen, ketoprofen, COD and nitrogen compounds from pharmaceutical wastewater using aerobic suspension-sequencing batch reactor (ASSBR). *Sep Purif Technol.* 2016;157:215-21. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.11.017>
52. Nguyen LN, van de Merwe JP, Hai FI, Leusch FDL, Kang J, Price WE, et al. Laccase-syringaldehyde-mediated degradation of trace organic contaminants in an enzymatic membrane reactor: Removal efficiency and effluent toxicity. *Bioresour Technol.* 2016;200:477-84. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.054>
53. Ávila C, García-Galán MJ, Borrego CM, Rodríguez-Mozaz S, García J, Barceló D. New insights on the combined removal of antibiotics and ARGs in urban wastewater through the use of two configurations of vertical subsurface flow constructed wetlands. *Sci Total Environ.* 2021;755:142554. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142554>
54. Lakho FH, Le HQ, Van Kerkhove F, Igodt W, Depuydt V, Desloover J, et al. Water treatment and re-use at temporary events using a mobile constructed wetland and drinking water production system. *Sci Total Environ.* 2020;737:139630. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139630>
55. Meza LC, Piotrowski P, Farnan J, Tasker TL, Xiong B, Weggler B, et al. Detection and removal of biologically active organic micropollutants from hospital wastewater. *Sci Total Environ.* 2020;700:134469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134469>
56. Top S, Akgün M, Kıpçak E, Bilgili MS. Treatment of hospital wastewater by supercritical water oxidation process. *Water Res.* 2020;185:116279. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116279>
57. Vela N, Fenoll J, Garrido I, Pérez-Lucas G, Flores P, Hellín P, et al. Reclamation of agro-wastewater polluted with pesticide residues using sunlight activated persulfate for agricultural reuse. *Sci Total Environ.* 2019;660:923-30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.060>
58. Matamoros V, Rodríguez Y, Albaigés J. A comparative assessment of intensive and extensive wastewater treatment technologies for removing emerging contaminants in small communities. *Water Res.* 2016;88:777-85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.058>
59. Cesaro A, Belgiorno V. Removal of endocrine disruptors from urban wastewater by advanced oxidation processes (AOPs): a review. *Open Biotechnol J.* 2016;10(1). <https://doi.org/10.2174/1874070701610010151>