

# Estrategias de Bioremediación para tratamiento de Contaminantes Emergentes: una visión desde la Fito-remediación

## Bioremediation strategies for the treatment of Emerging Contaminants: a view from Phytoremediation

Enrique J. Peña-Salamanca<sup>1</sup> Juan C. Ramírez-Lamus<sup>1</sup> Hernán M. Cabrera-Arana<sup>1</sup>   
Eliana M. Jiménez-Bambague<sup>2</sup> Carlos A. Madera-Parra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad del Valle, Santiago de Cali-Colombia.

<sup>2</sup>Escuela EIDENAR Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, Santiago de Cali-Colombia.

### Resumen

**Introducción:** Los contaminantes emergentes (CEs) son una amplia y creciente categoría de sustancias encontradas en el ambiente que solo recién se reconoce como significativos contaminantes del agua. La inabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para remover efectivamente CEs hace necesarios métodos de tratamientos alternativos y ambientalmente amigables.

**Objetivo:** El objetivo de la revisión es explorar estrategias de bioremediación para contaminantes emergentes usando humedales construidos y el papel de las plantas en la fitoremediación de aguas servidas.

**Metodología:** Considero una revisión bibliográfica usando las bases de datos electrónicas de la biblioteca de la Universidad del Valle, específicamente SCOPUS y ScienceDirect (Elsevier). La búsqueda usó palabras claves como "Contaminantes Emergentes", "Humedales Construidos" y de "Plantas Tropicales en Fitoremediación" y se priorizaron las publicaciones de los últimos 3 años.

**Resultados:** La remoción de CEs en HCs involucra complejos procesos físicos, químicos y biológicos, los que son influenciados por el diseño y parámetros operacionales del sistema. Los HC varían significativamente en diseño, con las configuraciones que incluyen sistemas de flujo superficial (FS) y subsuperficial (FSS), así como flujo horizontal (HFSS) y vertical (VFSS). Las configuraciones difieren en tipo de medio, profundidad y en la eficiencia del tratamiento.

**Conclusiones:** Esta revisión examina la presencia de CEs en ambientes acuáticos y explora el uso de las plantas en HC como estrategias de fitoremediación. Los hallazgos indican que los HC son una alternativa sostenible y efectiva con mecanismos de remoción claves -incluyendo biodegradación, adsorción de sustrato y ingreso de macrofita- jugando un papel crucial en eliminar CEs recalcitrantes. El diseño y condiciones operacionales de los HC impactan significativamente la eficiencia de fitoremediación.

**Palabras clave:** Contaminantes Emergentes (CE). Humedales Construidos (HC). Fitoremediación de Aguas Residuales, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Mecanismos y Eliminación de Contaminantes

### Abstract

**Introduction:** Emerging Contaminants (ECs) are a broad and growing category of substances found in the environment, which have only recently been recognized as significant water pollutants. The inability of conventional wastewater treatment plants (WWTPs) to effectively remove ECs underscores the need for alternative, cost-effective, and environmentally friendly treatment methods.

**Objective:** The objective of this review is to explore bioremediation strategies for emerging contaminants (ECs) using constructed wetlands (CWs) and the role of plants in wastewater phytoremediation. We discuss ECs such as pharmaceuticals, personal care products, pesticides, hormones, perfluorooctyl substances, and microplastics.

**Methodology:** The methodology involved a bibliographic review using electronic databases from the Universidad del Valle Library, specifically SCOPUS and ScienceDirect (Elsevier). The search was conducted using keywords such as "Emerging Contaminants (ECs)," "Constructed Wetlands (CWs)," and "Tropical Plants in Phytoremediation" and publications from the last 3 years were prioritized.

**Results:** The removal of ECs in CWs involves a complex interplay of physical, chemical, and biological processes, which are influenced by the design and operational parameters of the system. CWs vary significantly in design, with major configurations including surface flow (SF) and subsurface flow (SSF), as well as horizontal subsurface flow (HSSF) and vertical subsurface flow (VSSF) systems. These configurations differ in media type, depth, and overall treatment efficiency.

**Conclusions:** This review examines the presence of ECs in aquatic environments and explores the use of plants in CWs as phytoremediation strategies. Findings indicate that CWs are a sustainable and effective alternative, with key removal mechanisms—including biodegradation, substrate adsorption, and macrophyte uptake—playing a crucial role in eliminating recalcitrant ECs. The design and operational conditions of CWs significantly impact phytoremediation efficiency.

**Keywords:** Emerging Contaminants (EC). Constructed Wetlands (CW). Wastewater Phytoremediation, Wastewater Treatment Plant (WWTP). Mechanisms and elimination of pollutants.

### ¿Cómo citar?

Peña-Salamanca, E.J., Ramírez-Lamus, J.C., Cabrera-Arana, H.M., Jiménez-Bambague, E.M., Madera-Parra, C.A Estrategias de Bioremediación para tratamiento de Contaminantes Emergentes: una visión desde la Fito-remediación Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(1)e-30213470

<https://doi.org/10.25100/iycc.v27i1.13470>

Recibido: 20-12-23

Evaluado: 4-05-24

Aceptado: 10-10-24

Online: 24-02-25

### Correspondence

enrique.pena@correo.univalle.edu.co



### Contribution to the literature

#### ¿Por qué se realizó?

Esta revisión analiza las estrategias para la biorremediación de contaminantes emergentes (CE) mediante humedales artificiales (HC) y el papel de las plantas en la fitoremedición de aguas residuales. En América Latina, una región que enfrenta desafíos ambientales relacionados con los CE (una categoría amplia y creciente de sustancias creadas por el hombre que se encuentran en el medio ambiente y que han sido reconocidas como contaminantes importantes del agua), existe información limitada sobre su distribución en el medio ambiente. Describimos varios CE, incluidos productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, pesticidas, hormonas, sustancias perfluoroalquiladas y microplásticos, en aguas residuales, así como el uso de plantas en la fitoremedición con CW.

#### ¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Se han desarrollado varias metodologías para degradar y eliminar los CE, reduciendo su impacto ambiental. Los estudios previos y en curso se han centrado en la degradación y eliminación de contaminantes mediante tratamientos (1) físicos, (2) químicos y (3) biológicos. La eliminación efectiva de CE depende de mecanismos como la biodegradación, la adsorción del sustrato y la absorción de macrófitos. Las plantas de CW han demostrado un sólido desempeño en la eliminación de EC a través de las acciones combinadas de sustratos, plantas y microorganismos. Esta revisión resume el desempeño y la eficiencia de la eliminación de productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP) en diferentes sistemas que utilizan plantas de CW. Revisamos los avances recientes en la comprensión de los diversos mecanismos y vías involucradas en la atenuación y mitigación de PPCP y hormonas esteroides a través de la fitoremedición en plantas de CW.

#### ¿Qué aportan estos resultados?

La mayoría de las investigaciones se han centrado en los roles de los sustratos y microorganismos, mientras que menos estudios describen las contribuciones directas (absorción y degradación de la planta) e indirectas (procesos de la rizosfera) de las plantas de CW en la eliminación de EC. Para aclarar los mecanismos de eliminación de EC por las plantas en CW, resumimos los procesos fisiológicos, bioquímicos y celulares involucrados en la fitoremedición. La presencia de EC en el medio ambiente es particularmente preocupante porque a menudo se presentan como mezclas, lo que puede conducir a efectos sinérgicos indeseables. La presencia generalizada de EC potencialmente tóxicos resalta la necesidad urgente de comprender mejor su aparición, destino e impacto ecológico. Proporcionamos un análisis del potencial de eliminación de EC en CW, los factores influyentes y los mecanismos de eliminación.

### Biodegradation, Phytoremediation and Sorption



Root uptake (plant)

Microbial degradation (substrate)

## Introducción

Las aguas residuales (WW) son aguas que han sido contaminadas por actividades domésticas, industriales y comerciales y deben ser tratadas antes de ser descargadas en otros cuerpos de agua para evitar la contaminación de las aguas subterráneas. Contienen varios contaminantes, incluidos metales pesados, contaminantes orgánicos e inorgánicos. Los Contaminantes Emergentes (ECs) son una categoría amplia y creciente de sustancias artificiales que se encuentran en el medio ambiente, que solo recientemente han sido reconocidas como contaminantes significativos del agua (1-2). Las principales fuentes de CE incluyen plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que procesan aguas residuales domésticas, efluentes hospitalarios y aguas residuales de plantas de fabricación de productos químicos, operaciones ganaderas y actividades agrícolas (3). La presencia de CE en el medio ambiente es particularmente preocupante porque a menudo se presentan en forma de mezclas (4-5), lo que puede provocar efectos sinérgicos indeseables. La presencia generalizada de CE potencialmente tóxicos pone de manifiesto la necesidad urgente de comprender mejor su aparición, destino e impacto ecológico.

Se han llevado a cabo investigaciones sobre una amplia variedad de contaminantes, pero los CE incluyen principalmente microcontaminantes como productos farmacéuticos, hormonas o disruptores endocrinos, plaguicidas, toxinas (2) y colorantes sintéticos industriales o contaminantes que contienen colorantes (6). Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son generalmente ineficaces para eliminar los EC y no se monitorean de manera rutinaria. En las regiones más pobres de los países emergentes, como algunas zonas de América Latina, las condiciones inadecuadas de tratamiento del agua aumentan la exposición humana a las CE. Llorca et al (7) proporcionaron una visión general de las CE orgánicas en la biota marina y de agua dulce de América Latina entre 2002 y 2016. Del mismo modo, Peña-Guzmán et al (8) reportaron datos sobre los niveles de CE en el ciclo urbano del agua de 11 países de América Latina entre 1999 y 2018. Entre las CE más estudiadas se encuentran los farmacéuticos, seguidos de los productos de cuidado personal. Las CE más comúnmente reportadas incluyen 17 $\beta$ -estradiol, bisfenol A y estrona (8).

La comparación de las concentraciones de CE en diferentes países es difícil debido a la falta de estudios en algunas regiones y a la variabilidad de las matrices hídricas. Algunos estudios se centran en las aguas residuales, mientras que otros examinan las aguas superficiales o el agua potable. En América Latina, varios países se encuentran entre los mayores usuarios y consumidores de AE, que van desde pesticidas y fertilizantes hasta productos de cuidado personal. Sin embargo, existe un vacío significativo en la información sobre la distribución de las CE en el medio ambiente, con muy pocas revisiones exhaustivas sobre este tema (9).

Esta brecha de datos en América Latina refleja las tendencias observadas en otras regiones. En África, más de 35 publicaciones han informado sobre la presencia y el destino de los productos farmacéuticos, los productos de cuidado personal y los plaguicidas en los sistemas de agua, pero hay pocos o ningún dato disponible sobre las estrategias de remediación y control (10). En otros exámenes se han revisado diversas clases de CE tanto en las fuentes de agua convencionales utilizadas para beber (ríos, arroyos, lagos, pozos) como en los recursos hídricos no convencionales, como las aguas residuales tratadas (efluentes) utilizadas con fines domésticos y agrícolas en las

cinco regiones del continente africano. En ambos tipos de recursos hídricos se han identificado productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, productos químicos que alteran el sistema endocrino, plaguicidas, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) y microplásticos (11).

Se llevó a cabo una revisión de estos productos de CE, incluidos los productos farmacéuticos, los productos de cuidado personal y los pesticidas y fertilizantes, así como de los contaminantes emergentes, como las hormonas (productos químicos que alteran el sistema endocrino), las PFAS y los microplásticos. Los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP) en entornos acuáticos se consideran uno de los productos de CE más críticos y son motivo de creciente preocupación (12).

El uso de sistemas acuáticos basados en plantas, como los humedales artificiales, para el tratamiento de contaminantes convencionales ha sido bien documentado (13). La eliminación de PPCP en CW implica una compleja interacción de procesos físicos, químicos y biológicos, que pueden verse influenciados por el diseño y los parámetros operativos seleccionados para el tratamiento (14-15). Esta revisión resume el rendimiento y la eficiencia de la eliminación de PPCP en diferentes sistemas que utilizan plantas de CW. Además, revisamos los avances recientes en la comprensión de los diversos mecanismos y vías involucradas en la atenuación y mitigación de PPCPs y hormonas esteroides a través de la fitorremediación en CWs.

Estudios previos realizados por nuestro grupo evaluaron la remoción de compuestos farmacéuticos utilizando Lagunas de Algales de Alta Tasa (HRALs) para tratar efluentes de la PTAR en Cali, Colombia. Estos estudios informaron eficiencias de eliminación que oscilaron entre el 70% y el 100% para compuestos como ibuprofeno, paracetamol, indometacina, ketoprofeno y naproxeno. Además, se observaron eficiencias de eliminación entre el 50% y el 70% para el diclofenaco y el gemfibrozilo, mientras que la carbamazepina y su metabolito CBZ-Diol mostraron eficiencias de eliminación de aproximadamente el 50% (16).

En otro estudio, Jiménez-Bambague et al. (17) evaluaron un proceso de Electro-Oxidación (EO) para la eliminación de compuestos farmacéuticos en aguas residuales reales, no acondicionadas, tratadas mediante tratamiento primario químicamente mejorado (CEPT). Estos estudios indican que el tratamiento acoplado se puede aplicar a aguas residuales reales y no acondicionadas sin necesidad de reactivos químicos adicionales en el proceso de EO. De acuerdo con Jiménez-Bambague et al. (18), quienes evaluaron el sistema acoplado para el tratamiento de CE en aguas residuales reales, las eficiencias de remoción superaron el 80% para los compuestos pertenecientes a los grupos terapéuticos analgésicos/antiinflamatorios, hipolipidémicos y antiepilepticos. La eficiencia de este último grupo se multiplicó por dos a cinco con el tratamiento acoplado en comparación con los resultados obtenidos con las Lagunas de Algales de Alta Tasa (HRALs). Estos compuestos son hidrófilos y difíciles de mineralizar a través de procesos biológicos.

La mejora del rendimiento de este sistema acoplado se atribuye al hecho de que el 77% de la carga orgánica se eliminó mediante procesos biológicos, incluidas las CE eliminadas mediante biodegradación y fotodegradación. En consecuencia, el proceso de EO, utilizando electrodos de diamante dopado con boro (BDD), actuó como un sistema de pulido, dirigiéndose a los

contaminantes recalcitrantes que son difíciles de eliminar por medios biológicos (17-18). Las eficiencias de remoción se asociaron principalmente con la presencia de microalgas y mecanismos de remoción específicos, como la bioacumulación y biodegradación para el diclofenaco y la biodegradación para el ibuprofeno (19).

El objetivo de esta revisión es explorar estrategias de biorremediación para contaminantes emergentes (ECs) utilizando humedales construidos (CWs) y el papel de las plantas en la fitorremediación de aguas residuales (WWs). Hablamos de AE como los productos farmacéuticos, los productos de cuidado personal, los pesticidas, las hormonas, las sustancias perfluoroalquiladas y los microplásticos. Las CW se consideran una forma de "acoplamiento tecnológico" en la fitorremediación y, a pesar de ser una tecnología relativamente nueva, muestran un potencial significativo como alternativa verde para la gestión y mitigación de la CE. Este potencial es particularmente relevante en las regiones tropicales, donde la alta diversidad de plantas ofrece oportunidades para el manejo de la CE. Sin embargo, el uso de las armas químicas en estas áreas sigue siendo limitado debido a la falta de estudios y a la disponibilidad de especies vegetales adecuadas, lo que hace que la selección de plantas sea un factor crítico en la implementación de las armas químicas.

La metodología consistió en una revisión bibliográfica utilizando bases de datos electrónicas de la Biblioteca de la Universidad del Valle, específicamente SCOPUS y ScienceDirect (Elsevier). La búsqueda se llevó a cabo utilizando palabras clave como "Contaminantes Emergentes (EC)", "Humedales Construidos (CW)" y "Plantas Tropicales en Fitorremediación". Además, se consideraron los términos "Farmacéutico", "Contaminante" y "Agua". Se priorizaron las publicaciones de los últimos tres años (2021-2023).

### Contaminantes Emergentes (CE)

En las últimas décadas, se han identificado numerosas sustancias nuevas, tanto antropogénicas como naturales, en el medio acuático, lo que suscita una creciente preocupación por su impacto en los ecosistemas y las aguas superficiales de todo el mundo. Estas sustancias, conocidas como *contaminantes emergentes (EC)*, también se conocen como microcontaminantes (MC), contaminantes de preocupación emergente (CEC) o compuestos orgánicos traza (TOC). La mayoría de las CE son de naturaleza orgánica y suelen presentarse en pequeñas cantidades, que van desde partes por billón (ppt o ng/L) hasta partes por millón (ppm o µg/L) (20). Las CE abarcan sustancias naturales o sintéticas que normalmente no están reguladas en el medio ambiente, pero que tienen efectos adversos conocidos o presuntos en la salud humana y los ecosistemas. Este grupo incluye productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP), pesticidas y hormonas, que pueden alterar los sistemas endocrinos humanos y de vida silvestre. Como resultado, estas sustancias se clasifican como compuestos disruptores endocrinos (EDC). Las CE procedentes de las industrias farmacéutica y cosmética, así como los plaguicidas, fertilizantes y otros productos químicos disruptores endocrinos, son motivo de gran preocupación y representan importantes fuentes de contaminación (1, 21).

## Productos Farmacéuticos (PP)

La presencia de CE en el medio ambiente, particularmente en el agua, se atribuye principalmente a la descarga de aguas residuales tratadas. Los procesos convencionales de tratamiento secundario, como los lodos activados y los filtros percoladores, no están diseñados para eliminar las CE, lo que lleva a su liberación en las aguas superficiales receptoras, incluidos ríos, lagos y zonas costeras (22). El consumo generalizado de productos farmacéuticos ha contribuido a su creciente presencia en el medio ambiente. Debido a su persistencia y daño potencial a los ecosistemas acuáticos, estos compuestos biológicamente activos se clasifican en categorías como analgésicos, antisépticos, antibióticos y otros productos químicos. Los principales residuos farmacéuticos incluyen antibióticos, antidepresivos, agentes quimioterapéuticos y hormonas (4). Se han detectado aproximadamente 771 sustancias farmacéuticas activas o sus productos de transformación en concentraciones que superan sus respectivos límites de detección, y se han identificado 528 compuestos diferentes en 159 países (23).

La mayoría de los productos farmacéuticos no son muy persistentes en el medio ambiente. Sin embargo, su liberación continua en cantidades pequeñas pero significativas de diversas fuentes hace que muchos de ellos sean *pseudo-persistentes*. Los productos farmacéuticos abarcan un amplio grupo de compuestos, con más de 3.000 productos farmacéuticos de uso común registrados solo en la Unión Europea, un número que sigue creciendo en todo el mundo. Como resultado, establecer regulaciones y pautas para estos compuestos, así como monitorear su distribución en el medio ambiente, es una tarea compleja y desafiante. Este desafío se ve agravado por los miles de compuestos adicionales que están registrados pero que no se usan comúnmente (24). Los aspectos legales relacionados con estos temas se discuten en *Puri et al.* (52).

## Productos de Cuidado Personal (PCP)

Los productos de cuidado personal (PCP, por sus siglas en inglés) son un grupo diverso de productos químicos que se utilizan para diversos fines, como la nutrición, la belleza y la higiene. Esta categoría abarca cosméticos, cuidado de la piel, cuidado del cabello, productos de limpieza y fragancias. Los productos para el cuidado de la piel y el cuidado personal se utilizan ampliamente en todo el mundo (2). Los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP) en las aguas residuales representan un peligro potencial para la salud humana y la vida silvestre, lo que genera preocupación entre los investigadores (25). Para mitigar el impacto de los PPCP, se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento, como métodos físicos, biológicos y químicos (26). Además, las CE, que se encuentran comúnmente en los productos para el cuidado de la piel, pueden acumularse a niveles peligrosos en el medio ambiente.

Las concentraciones más altas de CE se han identificado en cosméticos, con nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub> emergiendo como los principales contaminantes potenciales. Sin embargo, otros probables EC que se encuentran en los productos de cuidado personal incluyen nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, microplásticos, polidimetilsiloxano, filtros UV, hidroxitolueno butilado, repelentes de insectos, desinfectantes como el triclosán y contaminantes de fragancias como tonalida, fantolida y galaxolida. Además, también se han identificado conservantes como el ftalato de dietilo, las nanopartículas de ZnO, la benzofenona, el octinoxato, el metoxicinamato y varios parabenos,

incluido el butilparabeno, como posibles CE (2). El uso de macroalgas, microalgas y macrófitos acuáticos ha sido destacado por su excepcional capacidad de biorremediación y su capacidad para aclimatarse fácilmente a ambientes contaminados (23). Los residuos de productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP) se detectan ampliamente en ambientes acuáticos tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo, y se han logrado avances significativos en el estudio de sus niveles de distribución y exposición (27).

#### Pesticidas y fertilizantes

Los plaguicidas abarcan una amplia gama de agentes químicos diseñados para controlar la propagación de insectos, malezas y microbios. Generalmente se clasifican en cuatro tipos principales: herbicidas, fungicidas, insecticidas y bactericidas. Estos productos químicos ingresan a los ambientes marinos principalmente a través de la escorrentía de los sitios de aplicación y, dependiendo de su solubilidad, pueden bioacumularse en organismos vivos y plantas (2). Los herbicidas se encuentran entre los contaminantes más prevalentes en los sistemas acuáticos debido a su amplio uso en la agricultura para el control de malezas. La expansión de la producción agrícola ha llevado a un mayor uso de pesticidas, con una parte significativa de estos productos químicos que se filtran en el suelo y el agua. En consecuencia, las tasas más altas de aplicación de plaguicidas dan como resultado concentraciones elevadas en estas matrices ambientales. Dado que la agricultura es uno de los principales contribuyentes a la contaminación de las aguas subterráneas debido al uso generalizado de plaguicidas, gran parte de la literatura disponible se centra en la detección y el análisis de estos productos químicos en los cuerpos de agua y los sistemas de riego (9).

Los plaguicidas se encuentran entre los contaminantes más frecuentes que se encuentran en las muestras de agua, siendo la atrazina, los organofosforados, los organoclorados y el glifosato los más comúnmente detectados. La agricultura es la principal causa de contaminación del suelo en Brasil, Argentina y Colombia, principalmente debido al uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes, así como al riego de cultivos con aguas residuales no tratadas o aguas superficiales contaminadas (9).

Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representan uno de los principales desafíos ambientales en América Latina. Una parte significativa de las aguas residuales industriales en esta región se descargan en el medio ambiente sin tratamiento, y la mayoría de las aguas residuales no tratadas finalmente ingresan a los cuerpos de agua (28).

#### Hormonas y compuestos disruptores endocrinos (EDC)

Las hormonas esteroides pertenecen a una clase específica de contaminantes emergentes (CE) que recientemente han recibido una atención significativa como sustancias químicas disruptoras endocrinas (EDC). Los EDC son un grupo diverso de moléculas que incluyen productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP), productos químicos sintéticos utilizados como solventes y lubricantes industriales, así como sus subproductos, plásticos [como el bisfenol A (BPA)], bifenilos polibromados (PBB), dioxinas y plastificantes (ftalatos) (29). Incluso en

concentraciones tan bajas como unos pocos nanogramos por litro, se ha demostrado que los EDC son fisiológicamente activos y capaces de acumularse en el medio ambiente, particularmente en el agua. Ingresan a los ecosistemas acuáticos a través de múltiples vías, incluidas las aguas residuales municipales e industriales, los vertederos y las fuentes no puntuales, como la escorrentía agrícola que contamina las aguas subterráneas (30).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) descargan una variedad de productos químicos al medio ambiente. Una revisión (2007-2021) sobre la ocurrencia de contaminantes orgánicos emergentes (COE) y EDC en aguas residuales, aguas superficiales y subterráneas en México identificó un total de 174 compuestos, incluidos productos farmacéuticos, hormonas, plastificantes, productos de cuidado personal, edulcorantes, medicamentos y pesticidas (31).

Otro estudio, en el que se utilizó un método analítico para rastrear el destino y el transporte de los compuestos orgánicos desde las EDAR hasta los ríos, detectó 5.783 compuestos orgánicos e identificó 88 CE, incluidos 22 EDC, 12 PPCP, 12 plaguicidas, 10 compuestos orgánicos volátiles (COV), 5 contaminantes orgánicos persistentes (COP) y 27 otros productos químicos (5). Además, la investigación sobre muestras de afluentes y efluentes de las EDAR encontró que los compuestos farmacéuticos son los más prevalentes (32). Estos hallazgos ponen de manifiesto la urgente necesidad de rediseñar las EDAR convencionales para minimizar las fugas de CE, evitando su acumulación en compartimentos ambientales donde plantean riesgos ecológicos (33).

#### Sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS)

Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) son una gran familia de productos químicos artificiales caracterizados por la fluoración de la totalidad o parte de su cadena de carbono, con un grupo funcional terminal. Estos contaminantes han suscitado importantes preocupaciones debido a su alta persistencia, bioacumulación y posible impacto epidemiológico. La creciente contaminación de las fuentes de agua con PFAS se ha convertido en un problema mundial, lo que pone de relieve la necesidad de una comprensión más profunda de su comportamiento en los sistemas de agua y aguas residuales (34). Una de las principales preocupaciones con respecto a las PFAS es su alta hidrofobicidad y la presencia de precursores de PFAS, que pueden representar entre el 33 % y el 63 % de la concentración total de PFAS en las plantas de tratamiento de agua y aguas residuales (EDAR) (34). Su alta solubilidad en agua y su débil adsorción a las partículas del suelo facilitan un transporte ambiental rápido y generalizado (35). Recientemente, se ha llamado la atención sobre la interacción entre las PFAS y la materia orgánica disuelta (DOM) derivada del suelo y el agua. El DOM compite con los PFAS por los sitios de adsorción en las superficies de los materiales, lo que reduce las tasas de eliminación de PFAS o aumenta su solubilidad en agua. En general, el ODM desempeña un doble papel en la adsorción, degradación y absorción de PFAS por parte de las plantas, dependiendo de su composición y grupos funcionales (36). La bioacumulación de PFAS en las plantas y sus efectos adversos asociados han suscitado una gran preocupación (37). Las altas concentraciones de PFAS se detectan comúnmente en plantas cerca de sitios contaminados, incluidas las instalaciones de fabricación de fluoroquímicos, los campos de entrenamiento de bomberos, los vertederos y las plantas de tratamiento de aguas residuales. Debido a su alta solubilidad en agua, las PFAS se absorben y translocan fácilmente dentro de las plantas, lo que aumenta el interés en sus posibles alteraciones

bioquímicas y moleculares (37). Dado que las plantas son parte integral de los ecosistemas, la absorción y acumulación de PFAS influyen en su destino ambiental y transporte, con implicaciones significativas para la salud humana. Por lo tanto, es crucial investigar las interacciones entre las plantas y las PFAS, en particular los mecanismos que rigen la biodisponibilidad, la absorción de PFAS y los factores que influyen en estos procesos (35, 38).

### Microplásticos (MP) y nanoplásticos (NP)

Otra preocupación emergente en la región latinoamericana es la presencia de microplásticos (MP) y nanoplásticos (NP) en muestras ambientales. Este tema, aunque relativamente nuevo a escala mundial, está ganando cada vez más atención en países como Brasil, México, Argentina y Ecuador. Para mayor información, los estudios de Tursi et al. (39) sobre MP, Trevisan et al. (40) sobre NP, y Mateos-Cárdenes (41) sobre MP y NP proporcionan información valiosa. La eliminación de MP del agua sigue siendo un desafío importante para mitigar la contaminación ambiental. Las plantas de tratamiento de agua tradicionales, similares a las que manejan otros contaminantes emergentes (EC), no están diseñadas específicamente para eliminar el MP y han sido identificadas en todo el mundo como una fuente importante de descarga de MP en el medio ambiente. Sin embargo, al igual que con otras CE, las tecnologías de tratamiento avanzadas ahora ofrecen soluciones viables para reducir las concentraciones de MP en los cuerpos de agua. Actualmente, se dispone de varios procesos físicos, químicos y biológicos para tratar el agua contaminada con MP, lo que presenta oportunidades clave para mejorar la calidad del agua y minimizar el impacto ambiental (39).

### Humedales Construidos (CW)

Los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP) en el medio acuático se clasifican como contaminantes emergentes (EC). El uso de sistemas acuáticos basados en plantas, como los humedales artificiales, para tratar estos contaminantes ha sido bien documentado. La eliminación de PPCP en CW implica una compleja interacción de procesos físicos, químicos y biológicos, que están influenciados por el diseño y los parámetros operativos del sistema. Esta revisión resume la eficiencia de la eliminación de PPCP en sistemas de CW basados en plantas y destaca los avances recientes en la comprensión de los procesos, mecanismos y estrategias de remediación involucrados. Las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales (EDAR) no están diseñadas específicamente para eliminar compuestos farmacéuticos, ya que su objetivo principal es la eliminación de sustancias fácilmente degradables o moderadamente biodegradables. Como resultado, los productos farmacéuticos a menudo se descargan en aguas superficiales, subterráneas y costeras. Si bien tecnologías como la ozonización, la ósmosis inversa y los procesos de oxidación avanzada pueden reducir eficazmente la contaminación farmacéutica, sus altos costos limitan la implementación generalizada. En consecuencia, existe una creciente demanda de métodos alternativos y rentables de tratamiento de aguas residuales con alta eficiencia de eliminación.

Los humedales artificiales (CW) ofrecen una alternativa prometedora para la eliminación farmacéutica, utilizando mecanismos bióticos y fisicoquímicos. Los procesos bióticos incluyen la degradación microbiana, la actividad de la biopelícula y la absorción por las raíces de las plantas, mientras que los procesos fisicoquímicos implican evaporación, fotodegradación, oxidación, hidrólisis y adsorción en las raíces de las plantas y el lecho de grava. Las CW son sistemas muy

complejos, que crean múltiples microambientes con diferentes condiciones fisicoquímicas que influyen en estos mecanismos de eliminación. Estos entornos, como el agua de los poros, la capa superior expuesta a la luz solar, las superficies de las plantas, las biopelículas de los sustratos y las biopelículas de las raíces, desempeñan un papel crucial en la descomposición de los contaminantes. Sin embargo, debido a esta complejidad, los mecanismos exactos de eliminación en las CW aún no se comprenden completamente.

### Configuración de Humedales Construidos

En general, los parámetros fisicoquímicos, como el potencial redox y la exposición solar en los humedales artificiales (CW), están fuertemente influenciados por el tipo de flujo. En consecuencia, los CW varían significativamente en diseño, con configuraciones principales que incluyen flujo superficial (SF) y flujo subterráneo (SSF), así como sistemas de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) y flujo subsuperficial vertical (VSSF). Estas configuraciones difieren en el tipo de medio, la profundidad y la eficiencia general del tratamiento. Por ejemplo, los CW SSF proporcionan un efecto rizosphere superior y una mayor superficie de adsorción en la zona de la raíz en comparación con los CW SF, lo que mejora la eliminación de contaminantes. Además, los sistemas híbridos combinan múltiples tipos de CW, como humedales de flujo superficial, subsuperficial, horizontal, vertical y flotante, ofreciendo soluciones de tratamiento personalizadas basadas en características específicas de las aguas residuales.

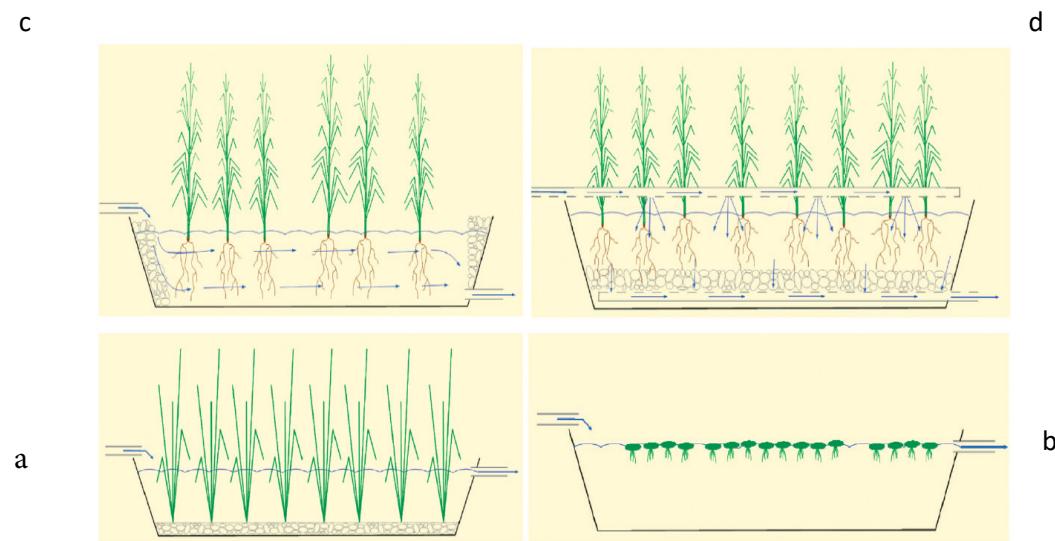
### Tipos de humedales artificiales y uso de plantas

Los humedales artificiales (CW, por sus siglas en inglés) son tecnologías de tratamiento rentables y basadas en la naturaleza que han sido ampliamente estudiadas para la eliminación de contaminantes, incluida la materia orgánica, los nutrientes (como el nitrógeno y el fósforo), así como los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP, por sus siglas en inglés) de las aguas residuales. Estos sistemas artificiales imitan las funciones de los humedales naturales, utilizando procesos biogeoquímicos naturales para filtrar y tratar el agua, al tiempo que proporcionan beneficios ecológicos y ambientales. Las CW suelen funcionar a través de un flujo impulsado por la gravedad, lo que requiere unos costos de puesta en marcha y mantenimiento significativamente más bajos en comparación con las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) convencionales.

### Remoción de contaminantes en humedales artificiales

Los humedales construidos (CW) se pueden clasificar en diferentes tipos, incluyendo flujo superficial libre (FS), flujo subsuperficial horizontal (HSS), flujo subsuperficial vertical (VSS), humedales flotantes (FW) y sistemas híbridos (Figura 1). Los estudios que comparan la eficiencia de la eliminación farmacéutica (dirigida a compuestos como el ibuprofeno, el naproxeno y el diclofenaco) entre las HSS-CW y las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) convencionales indican que las CW a menudo superan a las EDAR. Sin embargo, los estudios que comparan directamente las CW y las WWTP para el tratamiento de la PPCP son limitados. Además, la investigación sobre el comportamiento de PPCP dentro de las CW y los mecanismos específicos de eliminación, en particular las interacciones entre plantas y microbios en la degradación de PPCP, sigue siendo

insuficiente (25). La siguiente sección explora los mecanismos del proceso para explicar las variaciones en la eliminación de contaminantes emergentes (EC).



**Figura 1.** Humedal Construido de Flujo Subsuperficial (a) Horizontal, (b) Vertical, (c) Flujo superficial con vegetación emergente y (d) Flotante.

#### Productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP)

Las armas químicas han atraído cada vez más atención debido a su alta rentabilidad y beneficios ambientales. Son sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales que aprovechan los procesos naturales que involucran vegetación, suelos y ensamblajes microbianos para ayudar en el tratamiento de aguas residuales. Se han empleado varias tecnologías para la eliminación de PPCP, incluida la filtración por membrana, la adsorción mediada por carbón activado, la ozonización y los biorreactores de membrana (MBR). Sin embargo, a pesar de la disponibilidad de múltiples métodos de tratamiento, muchas tecnologías de eliminación de PPCP sufren de una eficiencia limitada, altos costos de construcción y costoso mantenimiento a largo plazo (25, 42, 43).

Recientemente, ha crecido el interés en la viabilidad del uso de CW para la eliminación de PPCP de las aguas residuales con alta eficiencia. Los estudios citados en Salah et al. (44), como Oliveira et al. (2019), informan que una CW de flujo horizontal que contenía *Eichhornia crassipes* eliminó el 89% del ibuprofeno (IBU) y el 94% de la cafeína (CAF). De manera similar, García et al. (2020) informaron una eliminación del 92% y el 98% de triclosán (TCS) y diclofenaco (DCL) utilizando CW.

El rendimiento de la eliminación de CW depende de la especie de PPCP. El IBU mostró una mayor eficiencia de remoción (> 70 % en masa) en comparación con otros PPCP, como carbamazepina (CBZ), acesulfamo (ACE), diclofenaco (DCL), cafeína (CAF), benzotriazol (BTZ) y naproxeno (NPX), en las mismas condiciones de tratamiento. Delgado et al. (2020) informaron que el CBZ exhibió una baja eficiencia de eliminación, probablemente debido a su baja biodegradabilidad y limitada absorción por parte de las plantas. Los mecanismos de eliminación de PPCP en las CW son complejos e implican una combinación de procesos químicos, físicos y biológicos como

la fotodegradación, la volatilización, la adsorción del sustrato, la precipitación, la hidrólisis, la degradación microbiana y la absorción y acumulación de plantas. Los investigadores han intentado mejorar el rendimiento de la CW optimizando sus tres componentes clave: plantas, sustratos y microorganismos. Sin embargo, las revisiones y análisis exhaustivos de los estudios recientes sobre la eliminación de antibióticos (PP) y otros contaminantes (CP) basados en CW siguen siendo limitados (45).

Por lo tanto, es necesario comprender los mecanismos de degradación, eliminación y retención de PPCP con base en información estadística actualizada. La aplicación de CW para la eliminación de PPCP está ganando actualmente atención como un sistema de tratamiento secundario rentable. Sin embargo, la eliminación de PPCP en las CW depende en gran medida de sus interacciones con sustratos, plantas y comunidades microbianas (44). Estas revisiones proporcionan un análisis detallado del potencial de eliminación de PPCP en las CW, los factores clave que influyen y los mecanismos críticos de eliminación (44, 45).

#### Hormonas esteroides (SH)

En esta sección se revisan las diferencias en la eficiencia de remoción de contaminantes en cuatro tipos de humedales artificiales. Específicamente, examinamos la eliminación de hormonas esteroides en humedales de flujo superficial libre (FS), flujo horizontal (HF), flujo vertical (VF) e híbridos (H). La eficiencia promedio de eliminación de 11 hormonas esteroides (SH) osciló entre el 55% y el 100%. Para la mayoría de las hormonas esteroides, la biodegradación (aeróbica y/o anaeróbica) es el principal mecanismo de eliminación, seguido de la adsorción de la planta y la adsorción del sustrato. Las propiedades fisicoquímicas de los SH también influyen en su eliminación (42). Entre los cuatro tipos de CW estudiados, VF demostró la mayor eficiencia de remoción, seguido por HF, sistemas híbridos y humedales FS. Los CW de VF superaron a los CW de HF debido a la mayor eficiencia de la biodegradación aeróbica en comparación con los procesos anaeróbicos. Varios SH, como el 17 $\alpha$ -etinilestradiol, el estriol, la progesterona y la testosterona, se degradan más eficazmente en condiciones aeróbicas.

Las plantas y la matriz de soporte, junto con los factores clave de diseño y operación, como el área, la profundidad, la tasa de carga hidráulica, el tiempo de retención hidráulica y la tasa de carga orgánica, también influyen en la eficiencia de la eliminación. Además, los parámetros fisicoquímicos, como el oxígeno disuelto del efluente, la temperatura y el pH, desempeñan un papel crucial (42). Por lo tanto, la selección del tipo de CW adecuado, la optimización del diseño y la implementación, y la consideración de las propiedades fisicoquímicas de los compuestos objetivo son cruciales para un tratamiento eficaz.

Como se ha comentado, las CW representan una alternativa sostenible y eficaz para eliminar los contaminantes emergentes (EC). Sin embargo, una comprensión profunda de los mecanismos de eliminación, incluida la biodegradación, la adsorción de sustrato y la absorción de macrófitos, es esencial para optimizar el rendimiento de CW. El diseño de CW y los parámetros operativos tienen un impacto significativo en la eficiencia de eliminación.

Por lo tanto, es crucial analizar los procesos de diseño y los mecanismos de remoción en diferentes condiciones de operación, con un enfoque en los tipos de macrófitos, las comunidades microbianas y las variaciones del sustrato para determinar las condiciones óptimas. Además de estos factores, el rendimiento de la CW también está influenciado por el área de superficie del sustrato, las características de las aguas residuales y las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes. Kamilya et al. (45) discuten la eliminación de esteroides y antibióticos en los sistemas de CW, destacando los factores clave que afectan la eficiencia de la eliminación.

Más allá de entender macrófitos, microorganismos y sustratos, también es fundamental analizar los procesos de remoción y los mecanismos implicados en las CW. Además, un aspecto fundamental de la optimización de CW es el análisis de los procesos de remoción como la fotodegradación, la biodegradación, la fitorremediación y la adsorción, que interactúan de manera compleja (45).

Esta revisión consolida el conocimiento actual sobre la eliminación de contaminantes emergentes (EC) de las aguas residuales basada en CW. Los mecanismos de eliminación de CW incluyen procesos bióticos, como la degradación microbiana, la formación de biopelículas y la absorción de plantas, y procesos fisicoquímicos, como la evaporación, la fotodegradación, la hidrólisis oxidativa y la adsorción de raíces en el sustrato. Junto con los factores que influyen, estos mecanismos proporcionan un marco integral para optimizar la eliminación de productos farmacéuticos y de CE en las CW. Sin embargo, debido a las complejas interacciones entre los procesos bióticos y fisicoquímicos, los mecanismos de eliminación de CW aún no se comprenden completamente.

### Fitorremediación y selección de especies

#### Fitorremediación

En las plantas, se han descrito varias estrategias de fitorremediación, como la extracción, la degradación, la estabilización, la volatilización y la bioconcentración, junto con los mecanismos fisiológicos, bioquímicos y celulares involucrados en la mitigación de contaminantes (por ejemplo, metales). Una pregunta intrigante es si estos mecanismos también podrían aplicarse a los contaminantes emergentes (EC). Esta sigue siendo un área en desarrollo de interés científico, particularmente en lo que respecta al uso de especies de plantas tropicales en las CW.

Otro foco de investigación emergente en las CW es el papel de los mecanismos "directos" de fitodegradación en las plantas, que parecen desempeñar un papel menor en comparación con los mecanismos "indirectos", como las interacciones microbianas en las raíces de las plantas en los humedales. Se estima que los mecanismos "directos" representan menos del 20% de la eliminación de CE en las CW (46). Estos mecanismos incluyen la precipitación de PPCP en las superficies de las raíces, la formación de placas de hierro y la absorción y degradación directa de las plantas. Por el contrario, los efectos "indirectos" desempeñan un papel más importante, ya que mejoran la eliminación de PPCP a través de una mayor actividad microbiana de la rizosfera, más del doble que la del suelo, estimulada por la pérdida radial de oxígeno, las secreciones de exudado y la formación de ensamblajes supramoleculares entre PPCP y ácidos húmicos a partir de material vegetal en descomposición, lo que puede mejorar la eficiencia de eliminación de PPCP hasta cuatro veces.

Para comprender completamente los mecanismos internos de la eliminación de PPCP por parte de las plantas en CW, es esencial revisar los factores que influyen en el rendimiento y la eficiencia de la planta en la fitorremediación. La identificación y el análisis de estos factores han sido reconocidos como un área crítica para futuras investigaciones (46).

#### Fitorremediación y uso de especies tropicales: *Colocasia esculenta* (Araceae)

Uno de los objetivos de esta revisión es ampliar el inventario de especies vegetales aptas para la fitorremediación en CW (Tabla 1). Revisiones recientes de la literatura muestran una menor representación de especies vegetales, particularmente aquellas nativas de América Latina y Colombia.

Un estudio pionero sobre fitorremediación utilizando plantas tropicales se llevó a cabo a escala piloto en CWSS con tres especies: *Gynerium sagittatum*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia psittacorum* (47). Estas plantas demostraron ser aptas para la fitorremediación de lixiviados de vertederos y se clasificaron como acumuladores de Cr (VI). Además, los CW demostraron ser un sistema de tratamiento secundario rentable para los lixiviados intermedios de los vertederos (47).

**Tabla 1.** Familias y géneros distribuidos en Colombia que pueden ser considerados para su revisión como especies de plantas tropicales con potenciales aplicaciones de fitorremediación en Humedales Construidos (CWs).

Pteridaceae <i>Acrostichum</i> aureum L.	<a href="https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30007207-2">https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30007207-2</a>
Cyperaceae <i>Fimbristylis</i> spp. Vahl	<a href="https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30000197-2">https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30000197-2</a>
Heliconiaceae <i>Heliconia</i> spp. L.	<a href="https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:77126726-1">https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:77126726-1</a>
Onagraceae <i>Ludwigia</i> spp. L.	<a href="https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30000053-2">https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30000053-2</a>
Poaceae <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin.	<a href="https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30337627-2">https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30337627-2</a>
Pontederiaceae <i>Pontederia</i> azurea Sw.	<a href="https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30000882-2">https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30000882-2</a>
Araceae <i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott	<a href="https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:1170772-2">https://colplanta.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:1170772-2</a>

A continuación se describen ejemplos de especies de plantas tropicales con potencial uso en fitorremediación:

*Acrostichum aureum* es un helecho común que se encuentra en regiones tropicales y subtropicales. Si bien tiene potencial para la investigación en la eliminación de contaminantes emergentes, su clasificación como halófita (tolerante a la sal y adaptada a ambientes intermareales) limita su uso en sistemas de CW. Los estudios indican que no puede soportar el encharcamiento prolongado (de varios días a semanas), lo que mantendría sus raíces sumergidas. El papel de las halófitas en el tratamiento de aguas residuales salinas en América Latina se discute en Turcios et al. (48).

*Phragmites australis* es una planta con una distribución restringida a América Latina y es comúnmente estudiada por su uso potencial en fitorremediación. De manera similar, *Pontederia azurea* Sw., también conocida como *Eichhornia* spp. y comúnmente conocida como 'Buchón', es una planta flotante que se examina con frecuencia en la investigación de fitorremediación. Figura 2.

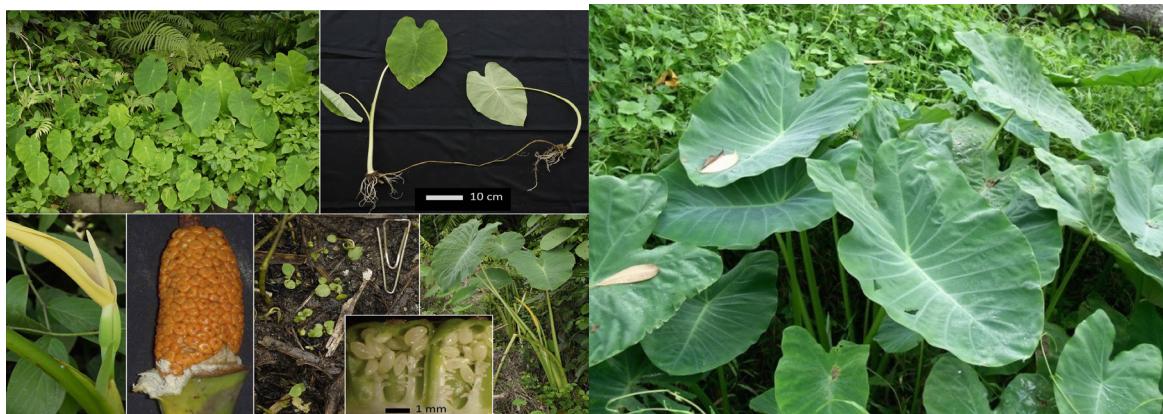


Figura 2. *Colocasia esculenta* (L.) Schott (Familia: Araceae) es comúnmente conocida como Taro, Papa China y Malanga. Varias especies de *Colocasia* tienen aplicaciones potenciales en la fitorremediación dentro de la CW (49).

*Colocasia esculenta* tiene una distribución mundial (cosmopolita), aunque su área de distribución nativa se extiende desde la India hasta el sur de China y Sumatra. Es un geófito tuberoso que se encuentra en climas tropicales, con múltiples aplicaciones ambientales, económicas y sociales. Sirve como alimento para animales (cormo) y como recurso medicinal y dietético para los humanos.

La selección de esta especie para los experimentos y pruebas en curso en un proyecto actual se basa no solo en su disponibilidad natural (fácilmente encontrable en viveros), sino también en su importancia global en la cultura agroalimentaria, particularmente en Asia, y su cultivo en el Pacífico colombiano.

Las especies del género *Colocasia* sp., que tienen una distribución cosmopolita no solo en los trópicos (incluyendo África, el Mediterráneo, Asia y Oceanía), eran los cultivos alimentarios más cultivados en todo el mundo antes del Intercambio Colombino (la transferencia de cultivos alimentarios entre las Américas y el Viejo Mundo) (49). <https://colombia.inaturalist.org/taxa/122835-Colocasia-esculenta>

La importancia de la investigación en EC, CW y fitorremediación es evidente en un análisis de casi 700 artículos de investigación publicados en 2019 y 2020. Estos estudios, indexados en Web of Science bajo la palabra clave “humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales”, incluyen 132 artículos centrados en temas emergentes como las aguas residuales tratadas con armas químicas, materiales de filtración, funciones de la vegetación, humedales flotantes para el tratamiento, microbiología de las aguas químicas, emisiones de gases de efecto invernadero y la sostenibilidad y los beneficios colaterales de las aguas químicas. Este análisis pone de relieve la creciente popularidad y diversificación de las CW, así como la necesidad de realizar más investigaciones sobre las relaciones entre el proceso y las propiedades en el diseño y la implementación de las mismas. Sin embargo, los estudios a largo plazo sobre las armas químicas siguen siendo escasos y, para avanzar en la tecnología de las mismas, también se deben realizar investigaciones en condiciones de campo a gran escala (50).

Una revisión de artículos de PubChem, ScienceDirect, el Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI) y Web of Science (2012-2022) examina la legislación y las políticas globales sobre contaminantes emergentes (EC). Esta revisión del estado del arte evalúa las CE y los marcos regulatorios adoptados por los países desarrollados y en desarrollo para mitigar la liberación de CE y promover la sostenibilidad del agua. Los aspectos clave incluyen la disponibilidad de agua, los patrones de uso, la generación y gestión de la contaminación, la salud del sistema acuático y la vulnerabilidad social.

El objetivo es proporcionar una visión general de las políticas y marcos mundiales actuales para evaluar y regular los productos químicos que plantean amenazas ambientales y biológicas. Además, el examen pone de relieve las perspectivas mundiales futuras, incluidas las iniciativas gubernamentales en curso, las nuevas medidas de política y las recomendaciones para mejorar la gestión y la eliminación de las CE en el medio ambiente (51).

## Conclusiones

Los contaminantes emergentes (CE) en el medio acuático plantean riesgos significativos para los ecosistemas y la salud humana. La incapacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) convencionales para eliminar eficazmente las EC subraya la necesidad de métodos de tratamiento alternativos, rentables y respetuosos con el medio ambiente. Esta revisión examina la presencia de CE en ambientes acuáticos y explora el uso de plantas en humedales construidos (CW) como estrategias de fitorremediación. Los hallazgos indican que las CW son una alternativa sostenible y eficaz, con mecanismos de eliminación clave, como la biodegradación, la adsorción de sustratos y la absorción de macrófitos, que desempeñan un papel crucial en la eliminación de las CE recalcitrantes.

Además, el diseño y las condiciones operativas de las CW tienen un impacto significativo en la eficiencia de la fitorremediación. Las revisiones centradas en este tema (52) analizan varias CE, los factores de diseño que afectan los mecanismos de eliminación de CW y el papel de la fitorremediación de aguas residuales como estrategia global de biorremediación.

### CRediT contribución de la autoría estadística

Conceptualization - Ideas: Enrique Peña-Salamanca, Eliana M. Jiménez-Bambague, Carlos A. Madera-Parra. Data Curation: Juan C. Ramírez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague. Formal analysis: Juan C. Ramírez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague. Acquisition of funding: Enrique Peña-Salamanca, Carlos A. Madera-Parra. Investigation: Juan C. Ramírez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague. Methodology: Enrique Peña-Salamanca, Eliana M. Jiménez-Bambague, Carlos A. Madera-Parra. Project Management: Enrique Peña-Salamanca, Eliana M. Jiménez-Bambague, Carlos A. Madera-Parra. Resources: Juan C. Ramírez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague. Software: Juan C. Ramírez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague. Supervision: Enrique Peña-Salamanca, Eliana M. Jiménez-Bambague, Carlos A. Madera-Parra. Validation: Enrique Peña-Salamanca, Juan C. Ramírez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M.

Jiménez-Bambague Carlos A. Madera-Parra. Visualization - Preparation: Enrique Peña-Salamanca, Juan C. Ramirez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague, Carlos A. Madera-Parra. Writing - original draft - Preparation: Enrique Peña-Salamanca, Juan C. Ramirez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague, Carlos A. Madera-Parra. Writing - revision and editing - Preparation: Enrique Peña-Salamanca, Juan C. Ramirez-Lamus, Hernán M. Cabrera-Arana, Eliana M. Jiménez-Bambague, Carlos A. Madera-Parra.

Financiamiento: no declarar.

**Agradecimientos:** Departamento Nacional de Planeación – CTel —Sistema General de Regalías de Colombia grants BPIN 2021000100424 y BPIN 2021000100492.

## Referencias

1. Rathi 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):124413. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124413>
2. Khan S, Naushad M, Govarthanan M, Iqbal J, Alfadul SM. Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research. *Environ Res.* 2022; 207 (112609):112609. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2021.112609>
3. Pal A, Gin KY-H, Lin AY-C, Reinhard M. Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Sci Total Environ.* 2010; 408 (24): 6062–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.026>
4. Goutam Mukherjee A, Ramesh Wanjari U, Eladl MA, El-Sherbiny M, Elsherbini DMA, Sukumar A, et al. Mixed contaminants: Occurrence, interactions, toxicity, detection, and remediation. *Molecules.* 2022; 27 (8):2577. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules27082577>
5. Zhang Q, Xu H, Song N, Liu S, Wang Y, Ye F, et al. New insight into fate and transport of organic compounds from pollution sources to aquatic environment using non-targeted screening: A wastewater treatment plant case study. *Sci Total Environ.* 2023; 863 (161031):161031. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161031>
6. Sharma R, Malaviya P. Constructed wetlands for textile wastewater remediation: A review on concept, pollutant removal mechanisms, and integrated technologies for efficiency enhancement. *Chemosphere.* 2022; 290 (133358):133358. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133358>
7. Llorca M, Farré M, Eljarrat E, Díaz-Cruz S, Rodríguez-Mozaz S, Wunderlin D, et I. Review of emerging contaminants in aquatic biota from Latin America: 2002-2016. *Environ Toxicol Chem.* 2017; 36 (7):1716–27. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/etc.3626>
8. 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. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
9. Souza MCO, Rocha BA, Adeyemi JA, Nadal M, Domingo JL, Barbosa F Jr. 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):157774. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157774>

10. Okoye CO, Okeke ES, Okoye KC, Echude D, Andong FA, Chukwudzie KI, et al. Occurrence and fate of pharmaceuticals, personal care products (PPCPs) and pesticides in African water systems: A need for timely intervention. *Heliyon*. 2022; 8 (3):e09143. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09143>
11. Shehu Z, Nyakairu GWA, Tebandeke E, Odume ON. Overview of African water resources contamination by contaminants of emerging concern. *Sci Total Environ*. 2022; 852 (158303):158303. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158303>
12. Yang Y, Ok YS, Kim K-H, Kwon EE, Tsang YF. Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. *Sci Total Environ*. 2017; 596–597:303–20. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.102>
13. Zhang D, Gersberg RM, Ng WJ, Tan SK. Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: a review. *Environ Pollut*. 2014; 184: 620–39. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.09.009>
14. Gorito AM, Ribeiro AR, Almeida CMR, Silva AMT. A review on the application of constructed wetlands for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern listed in recently launched EU legislation. *Environ Pollut*. 2017; 227:428–43. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.060>
15. Wang Y, Cai Z, Sheng S, Pan F, Chen F, Fu J. Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. *Sci Total Environ*. 2020; 701 (134736):134736. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736>
16. Jiménez-Bambague EM, Madera-Parra CA, Ortiz-Escobar AC, Morales-Acosta PA, Peña-Salamanca EJ, Machuca-Martínez F. High-rate algal pond for removal of pharmaceutical compounds from urban domestic wastewater under tropical conditions. Case study: Santiago de Cali, Colombia. *Water Sci Technol*. 2020; 82 (6):1031–43. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2020.362>
17. Jiménez-Bambague EM, Madera-Parra CA, Rangel-Delgado MF. Photo-Fenton and Electro-Fenton Performance for the Removal of Pharmaceutical Compounds in Real urban wastewater, *Electrochim. Electrochim Acta*. 2023; 442, 141905. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.141905>
18. Jiménez-Bambague EM, Villarreal-Arias DS, Ramírez-Vanegas OD, Gómez-Gómez DD, Madera-Parra CA, Peña-Salamanca EJ, et al. Removal of pharmaceutical compounds from real urban wastewater by a continuous bio-electrochemical process at pilot scale. *J Environ Chem Eng*. 2023; 11 (3):110130. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.110130>
19. Jiménez-Bambague EM, Florez-Castillo JS, Gómez-Angulo RD, Morales-Acosta PA, Peña-Salamanca EJ, Machuca-Martínez F, et al. Cell growth and removal capacity of ibuprofen and diclofenac by Parachlorella kessleri at bench scale. *J Chem Technol Biotechnol*. 2022; 97 (6):1416–23. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.6911>
20. Rodriguez-Narvaez OM, Peralta-Hernandez JM, Goonetilleke A, Bandala ER. Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chem Eng J*. 2017; 323:361–80. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.106>
21. Bilal M, Adeel M, Rasheed T, Zhao Y, Iqbal HMN. Emerging contaminants of high concern and their enzyme-assisted biodegradation - A review. *Environ Int*. 2019; 124:336–53. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.011>
22. Petrie B, Barden R, Kasprzyk-Hordern B. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Res*. 2015; 72:3–27. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053>

23. Couto E, Assemany PP, Assis Carneiro GC, Ferreira Soares DC. The potential of algae and aquatic macrophytes in the pharmaceutical and personal care products (PPCPs) environmental removal: a review. *Chemosphere*. 2022; 302 (134808):134808. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134808>
24. Patel M, Kumar R, Kishor K, Mlsna T, Pittman CU Jr, Mohan D. Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: Chemistry, occurrence, effects, and removal methods. *Chem Rev*. 2019; 119 (6):3510–673. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299>
25. AL Falahi OA, Abdullah SRS, Hasan HA, Othman AR, Ewadh HM, Kurniawan SB, et al. Occurrence of pharmaceuticals and personal care products in domestic wastewater, available treatment technologies, and potential treatment using constructed wetland: A review. *Process Saf Environ Prot*. 2022; 168:1067–88. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.082>
26. Kumar M, Sridharan S, Sawarkar AD, Shakeel A, Anerao P, Mannina G, et al. Current research trends on emerging contaminants pharmaceutical and personal care products (PPCPs): A comprehensive review. *Sci Total Environ*. 2023; 859 (Pt 1):160031. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160031>
27. Hawash HB, Moneer AA, Galhoun AA, Elgarahy AM, Mohamed WAA, Samy M, et al. Occurrence and spatial distribution of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment, their characteristics, and adopted legislations. *J Water Proc.engineering*. 2023; 52 (103490):103490. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103490>
28. Inter-American Development Bank (IDB)- A partner for Latin America and the Caribbean. 2018.
29. Diamanti-Kandarakis E, Bourguignon J-P, Giudice LC, Hauser R, Prins GS, Soto AM, et al. Endocrine-disrupting chemicals: an Endocrine Society scientific statement. *Endocr Rev*. 2009; 30 (4):293–342. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1210/er.2009-0002>
30. Kumar R, Qureshi M, Vishwakarma DK, Al-Ansari N, Kuriqi A, Elbeltagi A, et al. A review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2022; 6 (100219):100219. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100219>
31. Vázquez-Tapia I, Salazar-Martínez T, Acosta-Castro M, Meléndez-Castolo KA, Mahlknecht J, Cervantes-Avilés P, et al. Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico - A review. *Chemosphere*. 2022; 308 (Pt 1):136285. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>
32. Ulucan-Altuntas K, Manav-Demir N, İlhan F, Gelgor HB, Huddersman K, Tiwary A, et al. Emerging pollutants removal in full-scale biological treatment plants: A case study. *J Water Proc.engineering*. 2023; 51 (103336):103336. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103336>
33. Kasonga TK, Coetzee MAA, Kamika I, Ngole-Jeme VM, Benteke Momba MN. Endocrine-disruptive chemicals as contaminants of emerging concern in wastewater and surface water: A review. *J Environ Manage*. 2021; 277 (111485):111485. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111485>
34. Phong Vo HN, Ngo HH, Guo W, Hong Nguyen TM, Li J, Liang H, et al. Poly and perfluoroalkyl substances in water and wastewater: A comprehensive review from sources to remediation. *J Water Proc.engineering*. 2020; 36 (101393):101393. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101393>
35. Adu O, Ma X, Sharma VK. Bioavailability, phytotoxicity and plant uptake of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review. *J Hazard Mater*. 2023; 447 (130805):130805. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130805>
36. Qi Y, Cao H, Pan W, Wang C, Liang Y. The role of dissolved organic matter during Per- and Polyfluorinated Substance (PFAS) adsorption, degradation, and plant uptake: A review. *J Hazard*

Mater. 2022; 436 (129139):129139. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129139>

37. Li J, Sun J, Li P. Exposure routes, bioaccumulation and toxic effects of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) on plants: A critical review. *Environ Int.* 2022; 158 (106891):106891. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2021.106891>

38. Kavusi E, Shahi Khalaf Ansar B, Ebrahimi S, Sharma R, Ghoreishi SS, Nobaharan K, et al. Critical review on phytoremediation of polyfluoroalkyl substances from environmental matrices: Need for global concern. *Environ Res.* 2023; 217 (114844):114844. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2022.114844>

39. Tursi A, Baratta M, Easton T, Chatzisymeon E, Chidichimo F, De Biase M, et al. Microplastics in aquatic systems, a comprehensive review: origination, accumulation, impact, and removal technologies. *RSC Adv.* 2022 [citado el 3 de febrero de 2025];12 (44):28318–40. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ra/d2ra04713f>

40. Trevisan R, Ranasinghe P, Jayasundara N, Di Giulio RT. Nanoplastics in aquatic environments: Impacts on aquatic species and interactions with environmental factors and pollutants. *Toxics.* 2022; 10 (6):326. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/toxics10060326>

41. Mateos-Cárdenas A, van Pelt FNAM, O'Halloran J, Jansen MAK. Adsorption, uptake and toxicity of micro- and nanoplastics: Effects on terrestrial plants and aquatic macrophytes. *Environ Pollut.* 2021; 284 (117183):117183. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117183>

42. Ilyas H, van Hullebusch ED. Performance comparison of different types of constructed wetlands for the removal of pharmaceuticals and their transformation products: a review. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2020; 27 (13):14342–64. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-08165-w>

43. Lv M, Zhang D, Niu X, Ma J, Lin Z, Fu M. Insights into the fate of antibiotics in constructed wetland systems: Removal performance and mechanisms. *J Environ Manage.* 2022; 321 (116028):116028. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116028>

44. Salah M, Zheng Y, Wang Q, Li C, Li Y, Li F. Insight into pharmaceutical and personal care products removal using constructed wetlands: A comprehensive review. *Sci Total Environ.* 2023; 885 (163721):163721. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163721>

45. Kamilya T, Yadav MK, Ayoob S, Tripathy S, Bhatnagar A, Gupta AK. Emerging impacts of steroids and antibiotics on the environment and their remediation using constructed wetlands: A critical review. *Chem Eng J.* 2023; 451 (138759):138759. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2022.138759>

46. Hu X, Xie H, Zhuang L, Zhang J, Hu Z, Liang S, et al. A review on the role of plant in pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) removal in constructed wetlands. *Sci Total Environ.* 2021; 780 (146637):146637. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146637>

47. Madera-Parra CA, Peña MR, Peña EJ, Lens PNL. Cr(VI) and COD removal from landfill leachate by polyculture constructed wetland at a pilot scale. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2015; 22 (17):12804–15. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3623-z>

48. Turcios AE, Miglio R, Vela R, Sánchez G, Bergier T, Włodyka-Bergier A, et al. From natural habitats to successful application - Role of halophytes in the treatment of saline wastewater in constructed wetlands with a focus on Latin America. *Environ Exp Bot.* 2021; 190 (104583):104583. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104583>

49. Ahmed I, Lockhart PJ, Agoo EMG, Naing KW, Nguyen DV, Medhi DK, et al. Evolutionary origins of taro (*Colocasia esculenta*) in Southeast Asia. *Ecol Evol.* 2020; 10 (23):13530–43. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.6958>

50. Zhang H, Wang XC, Zheng Y, Dzakpasu M. Removal of pharmaceutical active compounds in wastewater by constructed wetlands: Performance and mechanisms. *J Environ Manage.* 2023; 325 (Pt A):116478. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116478>
51. Vymazal J, Zhao Y, Mander Ü. Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecol Eng.* 2021; 169 (106318):106318. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318>
52. Puri M, Gandhi K, Kumar MS. Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *J Environ Manage.* 2023; 332 (117344):117344. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117344>