

Contaminantes emergentes en el agua y las redes metal-orgánicas como agentes de remediación

Emerging contaminants in water and metal-organic networks as remediation agents

Nancy Nelly Zurita Méndez, Georgina Carbajal De La Torre y Marco Antonio Espinosa Medina

Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.

Contacto: marespmed@gmail.com

Resumen. Existen grupos de contaminantes orgánicos “emergentes” (COEs) hídricos caracterizados por una alta persistencia, baja degradación en el ambiente y con grandes efectos adversos a la salud y al medio ambiente, entre ellos se encuentran detergentes, hormonas, pesticidas, productos de cuidado personal, drogas ilícitas y fármacos. Su identificación y tratamiento presenta un interés creciente ya que se ha encontrado su presencia en las aguas residuales post-tratadas, en ríos, mares y en aguas subterráneas y hasta en el agua potable. Estos contaminantes no se eliminan en las plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR) convencionales por lo que es imperativo desarrollar tratamientos eficientes que permitan su remoción del medio acuático y contribuir a la solución de esta problemática medioambiental. Esta preocupación ha hecho que se volteen a ver a las estructuras de redes metal-orgánicas (MOF por sus siglas en inglés: Metal-Organic Frameworks) las cuales son materiales que presentan características atractivas para la remoción de COEs por su alta capacidad de adsorción, porosidad y área superficial, por lo que su investigación se ha ampliado como adsorbentes selectivos que incluyen la eliminación de tintes, agroquímicos, productos farmacéuticos entre otros.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, fármacos, redes metal-orgánicas.

Abstract. There are groups of water “emerging” organic pollutants (EOCs) characterized by high persistence, low degradation in the environment and with great adverse effects on health and the environment, among them are detergents, hormones, pesticides, personal care products, illicit drugs and pharmaceuticals. Their identification and treatment are of growing interest since their presence has been found in post-treated wastewater, rivers, sea, groundwater and even in drinking water. These contaminants are not eliminated in conventional wastewater treatment plants, so it is imperative to develop efficient treatments that allow their removal from the aquatic environment and contribute to the solution of this environmental problem. This concern has made them turn to metal-organic frameworks structures (MOFs), which are materials that present attractive characteristics for the removal of EOCs due to their high adsorption capacity, porosity and surface area, so its research has expanded as selective adsorbents that include the elimination of dyes, agrochemicals, pharmaceutical products among others.

Keywords: Emerging organic pollutants, pharmaceuticals, metal-organic frameworks.

¿Qué son los contaminantes emergentes (COEs)?

Imagina que estás en la ducha y al lavarte el cabello identificas la fragancia de tu champú favorito, huele a almizcle, a naturaleza, inhalas y haces tu rutina de baño. Tú no lo sabes, pero es posible que ese aroma característico provenga de una sustancia química llamada “Galaxolida” el cual es un compuesto orgánico heterocíclico que al entrar en contacto con el agua de la

ducha y transportarse al drenaje permanece disuelto en ella, en tan pequeñas concentraciones (generalmente en partes por millón o partes por trillón) que no se identifica y que posteriormente al tratar las aguas residuales, ni siquiera se considera su presencia, esta sustancia de fórmula C₁₈H₂₆O es sospechosa de disrupción endócrina y es altamente tóxico para la vida acuática (Murtagh, et al., 2022). Ahora recuerda todas tus rutinas diarias de higiene y cuidado personal, piensa en

cuantos productos farmacéuticos consumes y en los productos de limpieza y detergentes que utilizas; todos ellos con un coctel de compuestos químicos que están en contacto con agua y después son desechados, compuestos que tienen distinto origen y naturaleza química y que su presencia en el medio ambiente han pasado inadvertidas, causando problemas ambientales y de riesgo para la salud. Estos contaminantes se denominan “emergentes” (COEs) ya que no están lo suficientemente investigados ni regulados y a que el uso de las fuentes que los originan va en aumento.

Tipos de contaminantes emergentes en agua

Tal como podemos imaginarlo, los contaminantes emergentes son muy diversos. Comprenden una amplia gama de productos, se introducen continuamente en el ambiente, y se originan en aguas residuales de tipo doméstico e industrial, de los residuos de las plantas de tratamiento, de los efluentes hospitalarios y de las actividades agrícolas y ganaderas (IMTA, 2018). Sus concentraciones en el agua son muy bajas, hasta de mil nanogramos por litro (ng/L). Sin embargo, las funciones biológicas de los seres vivos se pueden ver alteradas tras la exposición a estos contaminantes y sus efectos ecotoxicológicos aún no pueden definirse totalmente, aunque se sabe que impactan en organismos de diferentes niveles tróficos (Gayosso-Morales, et al., 2021).

Los contaminantes emergentes en tan bajas concentraciones no los vemos, no tienen olor ni sabor, por lo que es posible que no los tengamos en cuenta cuando se encuentran en los entornos acuáticos (agua potable, aguas subterráneas, aguas superficiales, influentes y efluentes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales) por lo que su eliminación o control en el medio ambiente plantea un desafío significativo para los reguladores de políticas, los ingenieros y la comunidad científica.

Los COEs más representativos son:

▪ Pesticidas o plaguicidas

El uso de pesticidas y/o plaguicidas en la agricultura conlleva de forma innegable a que existan residuos de ellos y sus metabolitos detectados en entornos

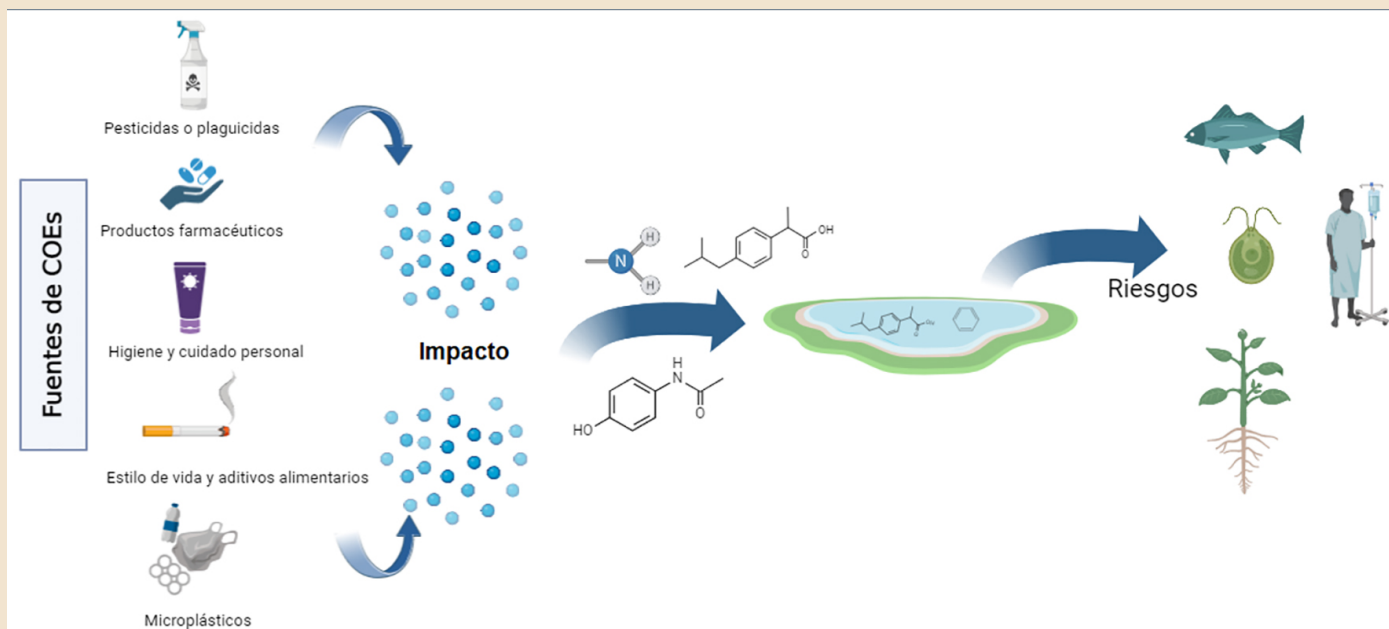


Figura 1. Contaminantes emergentes en aguas. Elaboración propia

acuosos. Algunos de los plaguicidas frecuentemente detectados son paratión carbofuran, atrazina, malatión y dimetoato (Rodríguez-Aguilar, et al., 2019).

Estos contaminantes tienen acción teratogénica y afectan los sistemas nervioso, endócrino e inmunológico por lo que se consideran generadores potenciales de enfermedades como cáncer, asma e infertilidad (Benítez-Díaz, et al., 2013).

▪ *Productos farmacéuticos*

Las vías principales en que estos productos llegan a los efluentes de aguas residuales son la excreción humana, su uso en la ganadería y el desecho de los productos no utilizados. Estos fármacos incluyen analgésicos/antiinflamatorios, antibióticos, antiepilépticos, medios de contraste en rayos X, anticonceptivos orales, esteroides, entre otros. En nuestro país se ha reportado la presencia de casi 40,000 ng/L de acetaminofén, 11,800 ng/L de naproxeno y 5,360 ng/L de sulfametoxazol en aguas residuales, estos fármacos al llegar al ambiente, pueden causar malformaciones en el cuerpo de organismos acuáticos tales como la trucha arcoíris o provocar cáncer o alteraciones del sistema endócrino a concentraciones por arriba de 200,000 ng/L (Ibarra-Rodríguez, et al., 2023). De forma preocupante, también se han encontrado en agua potable algunos fármacos como ibuprofeno, diclofenaco y carbamazepina (Tejada, et al., 2014).

▪ *Higiene y cuidado personal*

Los contaminantes de higiene y cuidado personal tienen un uso directo sobre el cuerpo humano. Algunos de los más comunes son los perfumes, los agentes de protección solar, los repelentes de insectos, jabones, cremas, tintes para cabello, etc. Las sustancias que conforman estos productos son variadas en estructura y composición química. Estos productos elevan de forma significativa el riesgo de exposición a sustancias químicas que pueden vincularse al cáncer, problemas hormonales, alergias o irritaciones. En el caso de la galaxolida (la fragancia del champú con aroma a almizcle) es un contaminante orgánico emergente que se utiliza ampliamente en productos de higiene personal y de consumo diario, como por ejemplo perfumes, cosméticos, jabones, colonias, acondicionadores de tejidos, entre otros. Debido a su gran producción industrial y elevado consumo, este compuesto se encuentra en las aguas residuales y se libera en el medio ambiente, principalmente a través de las depuradoras de aguas residuales, que no lo eliminan completamente. Varios estudios han demostrado su omnipresencia en pescados y mariscos, en concentraciones apreciables, más altas que en el caso de otras fragancias (Trabalón, et al., 2018).

▪ *Estilo de vida y aditivos alimentarios*

Dentro de estos compuestos se encuentran la cafeína, la nicotina, los

edulcorantes artificiales como el acesulfame, la sacarina, la sucralosa, los ftalatos y los aditivos alimentarios. Al igual que los fármacos, estos productos llegan a las aguas residuales mediante la excreción humana y desecho de productos no utilizados. Por mencionar los efectos de uno de ellos; el aspartame presente en más de 60,000 alimentos procesados en el mercado no es resistente a temperaturas altas en medios ácidos, por lo que investigaciones sugieren la posibilidad de efectos neurológicos y de comportamiento observados en mamíferos debido a los productos de transformación metabólica de este aditivo alimentario (Sánchez-Aceves, et al., 2021).

También pueden ser considerados como COEs los retardantes de llama bromados y clorados, subproductos de la desinfección, plastificantes, sustancias preservantes de madera y, en los últimos años, las nanopartículas, microplásticos, tierras raras, genes de resistencia a antibióticos y al virus SARS-CoV-2 (IMTA, 2021).

Tratamientos avanzados para remoción de contaminantes emergentes

Los COEs pueden llegar a los ecosistemas acuáticos cuando los efluentes de aguas residuales no son adecuadamente tratados y se descargan en ellos, bioacumulándose en sedimentos, flora y fauna debido a su

Tabla 1. Tratamientos de aguas residuales para remoción de contaminantes emergentes.

Tratamiento	Contaminante emergente	Eficiencia de remoción
Procesos individuales		
Ozonización	Fármacos	> 98 %
UV- fotólisis	Fármacos	30 – 70 %
Nanofiltración	Fármacos	15 – 100 %
Adsorción con carbón activado granular	Fármacos y pesticidas	20 – 50 %
Procesos combinados		
Coagulación/floculación, filtración con arena y carbón, ozonización y desinfección con cloro	Fármacos, drogas de abuso, pesticidas, estrógenos	85 – 100 %
Filtración, coagulación/floculación y cloración	Fármacos, retardantes de flama, plastificantes, biocidas, pesticidas, herbicidas	> 60 %
Dioxlorinación, coagulación/floculación, filtración con arenas, ultrafiltración, desinfección UV, ósmosis inversa y remineralización	Sulfonato perfluorooctanato/perfluorooctanato	≥ 99%

Tomado y modificado de Teodosiu, et al. (2018)

gran capacidad de persistencia. Los tratamientos de agua convencionales se enfocan en eliminar principalmente sólidos, materia orgánica y microorganismos patógenos. Los COEs no se eliminan por los métodos tradicionales, por lo que la búsqueda de tratamientos avanzados que sean capaces de eliminar la gran cantidad de estos contaminantes se hace cada vez más necesaria. Los tratamientos para este fin pueden incluir diversas técnicas (tabla 1), que incluyen procesos fisicoquímicos y biológicos. Sin embargo, algunos de estos procesos tienen la desventaja de que pueden conducir a la formación de compuestos intermediarios que pueden llegar a ser incluso más tóxicos que los COEs iniciales (Vasilachi et al. 2021).

Redes metal orgánicas (MOFs)

Existen también amplias investigaciones que permiten explorar la síntesis y el desarrollo de materiales híbridos que permitan ampliar el rango de tratamiento de contaminantes emergentes, así como su eficiencia, su estabilidad y que sean amigables con el medio ambiente. Las redes metalorgánicas (MOF) son materiales híbridos cristalinos porosos constituidos por grupos metálicos enlazados con matrices orgánicas multifuncionales. Han llamado la atención como materiales prometedores para la eliminación por adsorción en fase acuosa de COEs. Ciertos atributos como su gran capacidad de adsorción, alta superficie, porosidad y áreas, dimensiones y topologías ajustables, así como su reciclabilidad les confieren ventajas sobre los adsorbentes convencionales. Estas redes han demostrado más eficiencia en la remoción de COEs que las zeolitas, sílice

y materiales de carbono (Dhaka et al., 2019). Estudios recientes han permitido identificar tipos de MOF, en el campo de la adsorción de COEs y mediante ciertas modificaciones se ha mejorado su rendimiento (Duan et al., 2023). La remoción de COEs principalmente puede llevarse a cabo por mecanismos de adsorción y/o fotocatalisis; sin embargo, pueden también eliminarse mediante atracción electrostática, complejación superficial e intercambio iónico (Zhang et al., 2021).

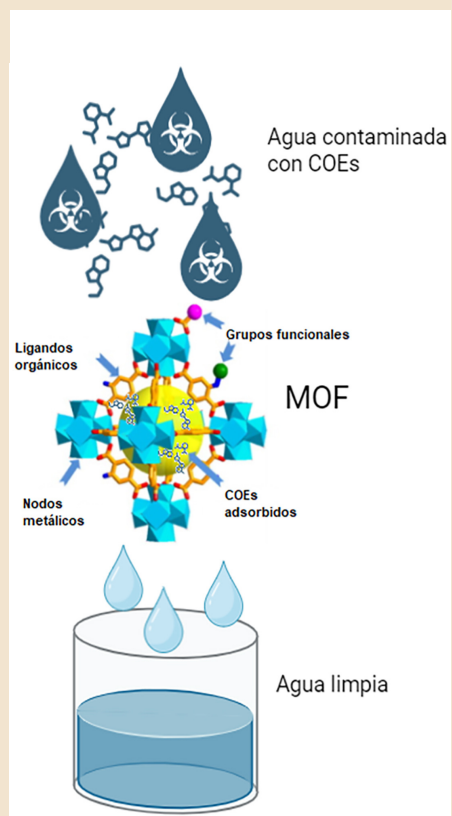


Figura 2. Estructura de una red metal-orgánica utilizada para remoción de COEs en agua. Elaboración propia.

Conclusiones

Los contaminantes emergentes son producto de fuentes antropogénicas y actualmente se observa un aumento en su incidencia en fuentes acuosas. Su presencia en los cuerpos de agua afecta las funciones biológicas de los seres vivos, considerándose generadores potenciales de enfermedades como cáncer, asma e infertilidad. Los métodos tradicionales no son capaces de eliminarlos, por lo que se diseñan técnicas que permitan una adecuada remoción. Las redes metal-orgánicas son materiales que permiten la remoción de contaminantes emergentes por adsorción. Si bien son materiales que aún están en evaluación, presentan capacidades para producirse a escalas industriales debido a la facilidad de síntesis, eficiencia y variedad de estructuras.

Referencias

Benítez-Díaz, P., & Miranda-Contreras, L. (2013). Contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de Latinoamérica. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 29, 7-23.

Dhaka, S., Kumar, R., Deep, A., Kurade, M. B., Ji, S. W., & Jeon, B. H. (2019). Metal-organic frameworks (MOFs) for the removal of emerging contaminants from aquatic environments. *Coordination Chemistry Reviews*, 380, 330-352. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.10.003>

Duan, Z., Sun, C., Zhang, X., Lin, W., & Shi, X. R. (2023). The Application of Metal-Organic Frameworks in the Adsorptive Removal of Harmful Species from Aqueous Solutions. *Mini-Reviews in Organic Chemistry*, 20(3), 227-239. <https://doi.org/10.2174/1570193X19666220404091505>

Gayosso-Morales, M. A., & Gonzalez-Pérez, B. K. (2021). Contaminantes emergentes y su relación con el ambiente. Publicación digital de la Red del Agua UNAM Número 17, octubre-diciembre 2021, 28. <http://www.agua.unam.mx/impluvium.html>

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. Producción más limpia, 7(2), 52-73.

Gil, M., et al., (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción más limpia*, 7:52-73. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>

Rodríguez, D. I., & García, L. A. (2023) Aguas residuales, plantas de tratamiento y contaminantes emergentes. *Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y diseño del Estado de Jalisco, A.C.* Consultado en: <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Aguas-residuales—pl>

antas-de-tratamiento-y-contaminantes-emergentes/337

- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2021). Perspectivas de los contaminantes emergentes en el mundo. Consultado en: https://www.gob.mx/imta/articulos/perspectivas-de-los-contaminantes-emergentes-en-el-mundo?id_iom=es
- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2018). El desafío de los contaminantes emergentes. Consultado de: <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-desafio-de-los-contaminantes-emergentes>
- Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlknecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510-521. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.154>
- Murtagh, C., Odriozola, V., Vallette, J., & Weber, J. (2022). The toxic trail of fragrance chemicals. *Material Research L3C*. Consultado de: https://womensvoices.org/wp-content/uploads/2023/01/Research-brief_-The-Toxic-Trail-of-Fragrance-Chemicals.pdf
- Oluwole, A. O., Omotola, E. O., & Olatunji, O. S. (2020). Pharmaceuticals and personal care products in water and wastewater: a review of treatment processes and use of photocatalyst immobilized on functionalized carbon in AOP degradation. *BMC chemistry*, 14:62, 1-29. <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00714-1>
- Rodríguez Aguilar, B. A., Martínez Rivera, L. M., Peregrina Lucano, A. A., Ortiz Arrona, C. I., & Cárdenas Hernández, O. G. (2019). Análisis de residuos de plaguicidas en el agua superficial de la cuenca del río Ayuquila-Armería, México. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 151-161. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.462>
- Sánchez Aceves, L. M., Gómez Oliván, L. M., Islas Flores, H., & Galar Martínez, M. (2021). Destino, ocurrencia y efectos tóxicos de edulcorantes artificiales, un nuevo tipo de contaminantes emergentes. *Contribuciones Selectas en Ecotoxicología y Química Ambiental. Capítulo 6*. Primera Edición.
- Tejada, C., Quiñonez, E., & Peña, M. (2014). Contaminantes emergentes en aguas: metabolitos de fármacos. Una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 10(1), 80-101.
- Trabalón, L., Alves, R. N., Castro, Ó., Nadal, M., Borrull, F., Pocurull, E., & Marques, A. (2018). Preliminary assessment of galaxolide bioaccessibility in raw and cooked FISH. *Food and chemical toxicology*, 122, 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.09.075>
- Vasilachi, I. C., Asiminicesei, D. M., Fertu, D. I., & Gavrilescu, M. (2021). Occurrence and Fate of Emerging Pollutants in Water Environment and Options for Their Removal. *Water*. 13(2), 181. <https://doi.org/10.3390/w1302018>
- Teodosiu, C., Gilca, A. F., Barjoveanu, G., & Fiore, S. (2018). Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: A review on processes and environmental performances assessment. *Journal of cleaner production*, 197, 1210-1221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.247>
- Zhang, S., Wang, J., Zhang, Y., Ma, J., Huang, L., Yu, S., ... & Wang, X. (2021). Applications of water-stable metal-organic frameworks in the removal of water pollutants: A review. *Environmental Pollution*, 291, 118076. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118076>