

Sección: Hot Science

Contaminantes ocultos en el agua: ¿quién puede con ellos?

Hidden contaminants in water: who can tackle them?

María Aurora Martínez-Trujillo
Sergio Esteban Viguera-Carmona
Mayola García-Rivero*

Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, C.P. 55210 Ecatepec de Morelos, Edo. de México, México.

*Autor para la correspondencia: mgarcia@tese.edu.mx

RESUMEN

¿Sabías que los analgésicos que consumes pueden terminar en los ríos y lagos sin que nadie lo detecte? El diclofenaco es uno de los miles de compuestos que llegan al agua en concentraciones tan pequeñas que resultan invisibles, pero con consecuencias reales para los ecosistemas acuáticos. Las plantas de tratamiento de aguas residuales no fueron diseñadas para eliminarlo, y las alternativas existentes son costosas o generan nuevos problemas. Sin embargo, la naturaleza ofrece una solución sorprendente: un hongo, que comúnmente se encuentra en bosques templados, llamado *Trametes versicolor*, con la capacidad de degradarlo de forma eficiente y sin generar toxicidad.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, biorremediación, diclofenaco.

SUMMARY

Did you know that the painkillers you take can end up in rivers and lakes without anyone detecting them? Diclofenac is one of thousands of compounds that reach water bodies in concentrations so small they go unnoticed, yet with real consequences for aquatic ecosystems. Conventional wastewater treatment plants were not designed to remove it, and existing alternatives are either costly or generate new problems. However, nature offers a surprising solution: a fungus commonly found in temperate forests, called *Trametes versicolor*, capable of degrading it efficiently and without generating toxicity.

Keywords: Emerging contaminants, bioremediation, diclofenac.

Introducción

Cuando se habla de contaminación, estamos acostumbrados a percibir el color u olor que los contaminantes imparten al suelo, agua o aire. Sin embargo, a finales de la década de los 90 surgió la preocupación por otros compuestos contaminantes que también pueden estar presentes en el ambiente, pero en concentraciones muy pequeñas, de nanogramos a microgramos por litro (ng/L a µg/L). Estas concentraciones son equivalentes a disolver un terrón de azúcar en el agua de entre 2 y 1,000 albercas olímpicas. En muchos casos, no se trata de sustancias nuevas, sino de compuestos que llevan décadas siendo utilizados y liberados al entorno sin que pudiéramos detectarlos, ya que las técnicas analíticas disponibles no tenían la sensibilidad necesaria para identificarlos en niveles tan bajos. Gracias a los avances recientes en tecnología analítica, hoy es posible rastrear su presencia en el ambiente con mayor precisión. A diferencia de los contaminantes clásicos, estos compuestos carecen de regulación ambiental específica y pueden ejercer efectos biológicos significativos incluso a concentraciones muy bajas, lo que ha desencadenado una especial preocupación. Por ello se les denomina contaminantes emergentes (CE) [1].

Entre los CE más ampliamente distribuidos se encuentran los fármacos de uso humano y veterinario, que llegan a los cuerpos de agua principalmente a través de las aguas residuales. En este artículo nos centraremos en el diclofenaco, un analgésico de uso común que representa una amenaza para los ecosistemas acuáticos.

¿De dónde provienen los contaminantes emergentes?

Los CE provienen del uso cotidiano de productos que forman parte de nuestra vida diaria: fármacos (como antiinflamatorios, anal-

gésicos y antibióticos); terapias hormonales (como anticonceptivos y otros tratamientos); productos de cuidado personal (como cremas y jabones) y plastificantes, entre otros. Su presencia en el ambiente no es casual, una parte de estas sustancias se libera sin transformarse por completo y llega, junto con las aguas residuales, a los cuerpos de agua. La Figura 1 muestra algunos ejemplos de CE detectados en cuerpos de agua de México.

En el ambiente, los CE pueden tener efectos nocivos sobre los organismos acuáticos. Algunos actúan como disruptores endocrinos, alterando el sistema hormonal y reproductor de peces y otras especies. Los antibióticos representan una amenaza adicional porque favorecen la supervivencia y proliferación de bacterias resistentes en los ambientes acuáticos, lo que también puede complicar el tratamiento de enfermedades infecciosas en humanos [2]. Además, varios CE tienen la capacidad de acumularse en los tejidos de los organismos, afectando cadenas alimentarias completas.

El camino oculto de los contaminantes emergentes

Los CE ingresan al ambiente principalmente a través de las aguas residuales domésticas e industriales no tratadas, o incluso tratadas, ya que las plantas de tratamiento fueron diseñadas para eliminar contaminantes convencionales [4]. Los sistemas terciarios diseñados para la degradación de los CE, tales como la oxidación avanzada, son costosos y pueden generar subproductos cuya toxicidad, en algunos casos, puede ser comparable o superior a la del contaminante original [1].

Entre los CE, el diclofenaco, uno de los antiinflamatorios de mayor consumo mundial, se ha convertido en uno de los casos más estudiados y permite ilustrar con claridad los retos que enfrentamos para eliminar los CE del agua. El diclofenaco es un medicamento de venta li-

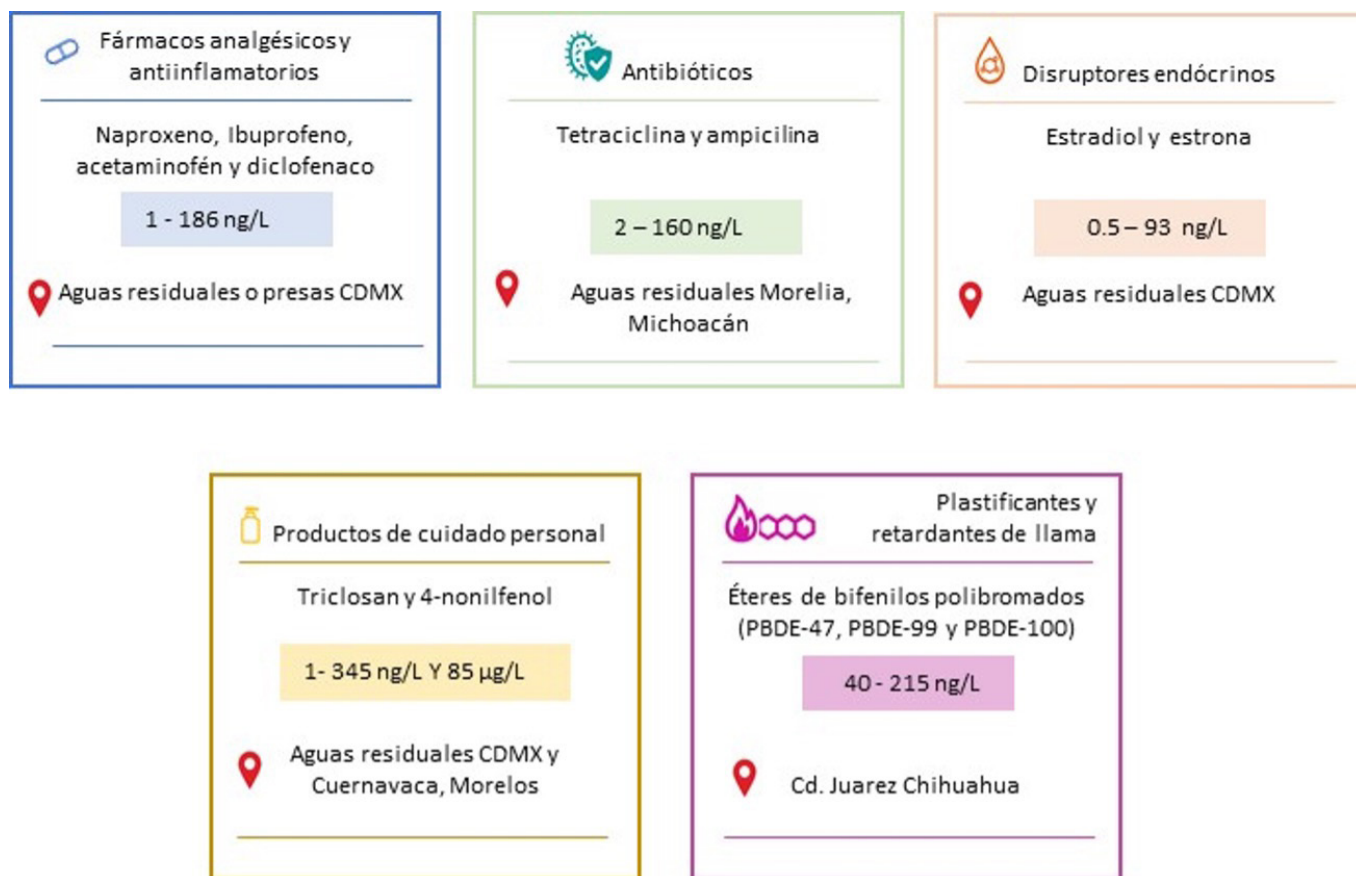


Figura 1. Compuestos representativos de grupos de contaminantes emergentes reportados en México y sus concentraciones ambientales [3].

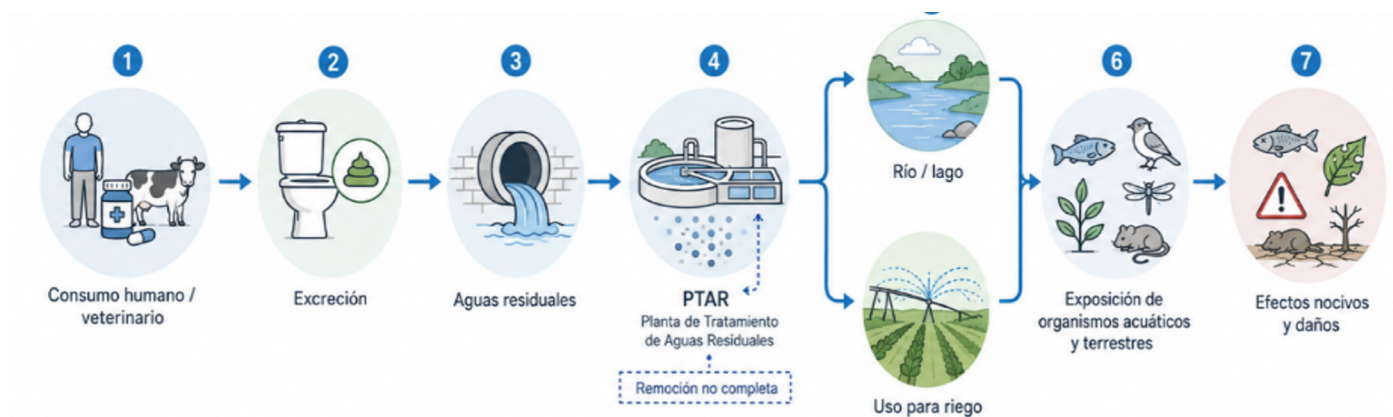


Figura 2. Rutas de entrada de los contaminantes emergentes al ambiente. Imagen generada con inteligencia artificial (Gemini, Google).

bre, ampliamente usado en medicina humana y veterinaria. Aunque no se tienen cifras de la concentración de diclofenaco liberada en forma activa tras su administración, se sabe que la fracción no metabolizada llega a las aguas residuales y al ambiente en concentraciones

detectables [5]. El problema se agrava por el manejo inadecuado de medicamentos en general. Se estima que cerca del 50% de los fármacos no utilizados termina en la basura o se desecha por el drenaje [6], cuyo destino final son los ríos, lagos, acuíferos y suelos agrícola-

las irrigados con aguas residuales (Figura 2).

En las concentraciones detectadas normalmente en el ambiente, el diclofenaco no genera una respuesta tóxica inmediata. Sin embargo, la exposición prolongada sí tiene un impacto, en Asia provocó el colapso de varias especies de buitres, que murieron al alimentarse de ganado tratado con el medicamento [5]. En peces y otros organismos acuáticos, el diclofenaco actúa como un agente silencioso que provoca malformaciones, dificulta la reproducción y compromete el desarrollo de los embriones, poniendo en riesgo la supervivencia de poblaciones enteras. En México, investigadores del IPN y la UAEMex han reportado que el diclofenaco afecta a organismos acuáticos nativos como *Hyaella azteca*, un pequeño crustáceo de agua dulce presente en ríos y lagos del país, causando daños que comprometen su supervivencia y reproducción en concentraciones similares a las detectadas en cuerpos de agua mexicanos [7].

La naturaleza como aliada

La comunidad científica ha buscado alternativas más eficientes para eliminar los CE del agua, la biotecnología ha emergido como una de las más prometedoras, al aprovechar la capacidad natural de diversos microorganismos para transformar o eliminar estos compuestos. Entre los microorganismos más estudiados para esta degradación se encuentran las bacterias y los hongos. Distintas bacterias, incluyendo *Raoultella*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, y otras, son capaces de degradar al diclofenaco gracias a una herramienta clave: las enzimas. Estas son proteínas específicas, que actúan como pequeñas tijeras moleculares, capaces de romper la estructura de estos contaminantes [5]. Sin embargo, esta acción tiene limitaciones y generalmente requiere llevarse a cabo bajo condiciones controladas de pH, temperatura y composición del medio, para lograr una eliminación significativa



Figura 3. *T. versicolor* creciendo sobre madera en descomposición en su hábitat natural (arriba) [8] y cultivo en caja Petri, mostrando el micelio utilizado en laboratorio para la degradación de CE (abajo).

de los CE.

Los hongos de la podredumbre blanca han demostrado ser los microorganismos degradadores más versátiles, entre ellos, *Trametes versicolor* destaca por su capacidad para descomponer una gran variedad de CE, incluido el diclofenaco. A diferencia de muchas bacterias, este hongo secreta sus enzimas directamente al medio que lo rodea, lo que le permite degradar una gama más amplia de compuestos. Esta versatilidad lo convierte en un candidato prometedor para el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas residuales más eficientes.

Un hongo de laboratorio contra los CE

Cuando escuchamos la palabra hongo, es probable que imaginemos las setas que crecen entre la hojarasca de un bosque, o el moho que aparece en el pan después de varios días. *T. versicolor* no es tan diferente, crece naturalmente sobre troncos y madera en descomposición en bosques templados de todo el mundo, donde se encarga de desintegrar estos restos leñosos y devolver sus nutrientes al suelo. De hecho, su nombre común en inglés, *turkey tail* (cola de pavo) refleja su apariencia; y su nombre científico, *versicolor*, hace referencia precisamente a otra de sus características más llamativas: sus bandas concéntricas de colores variables, que recuerdan el plumaje del ave.

Sin embargo, el hongo que se usa en el laboratorio luce muy diferente al que encontramos en el bosque. En condiciones controladas, en lugar de formar el cuerpo fructífero, crece en manera algodonosa, que es la forma que toma el micelio (Figura 3). Es precisamente este micelio el que produce y secreta las enzimas responsables de degradar compuestos complejos. En el laboratorio se aprovecha esta capacidad cultivando al hongo en condiciones óptimas de temperatura, pH y nutrientes para maximizar su actividad degradadora, algo que en la naturaleza ocurre de forma espontánea, pero en un proceso considerablemente más lento.

Degradación del diclofenaco en condiciones controladas

T. versicolor transforma parcialmente la estructura química del diclofenaco, generando productos de degradación que típicamente coinciden con los producidos por el hígado humano durante el metabolismo del medicamento [5]. Sin embargo, algunos de estos productos pueden ser más tóxicos que la molécula

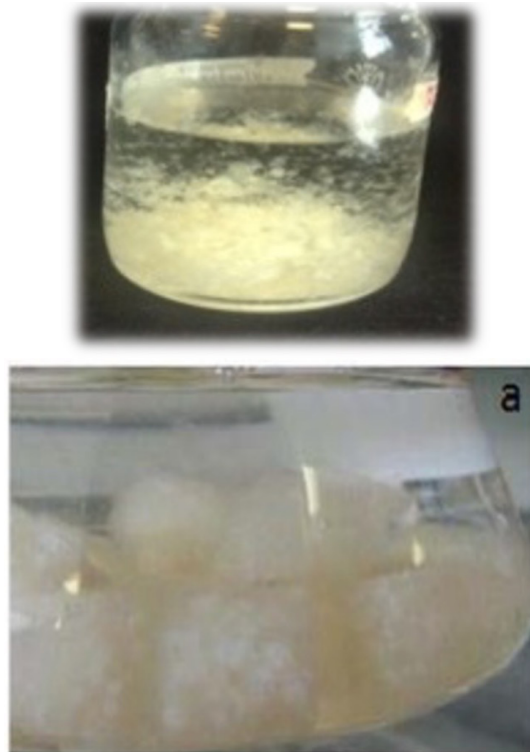


Figura 4. Cultivo de células libres *T. versicolor* (arriba) y cultivo de células inmovilizadas de *T. versicolor* en espuma de poliuretano (abajo).

original para ciertos organismos. Por ello, los investigadores buscan optimizar el proceso de degradación y evaluar su impacto mediante diferentes tipos de ensayos biológicos.

En los ensayos realizados en el Tecnológico de Estudios de Ecatepec (TESE) se han optimizado las condiciones de cultivo y los nutrientes requeridos por el hongo para maximizar la degradación del diclofenaco. Se ha determinado, además, que el uso del hongo en forma inmovilizada, es decir, creciendo sobre cubos de espuma de poliuretano que actúan como soporte físico, mejora significativamente la degradación (~60%) con respecto al cultivo tradicional, en la que el hongo crece libremente (~20%) (Figura 4).

Una forma sencilla para evaluar si el diclofenaco o sus productos de degradación siguen siendo tóxicos es mediante bioensayos de germinación de semillas. En estos ensayos,

las semillas se exponen al contaminante y se compara su crecimiento con el de semillas germinadas en agua destilada. En los ensayos realizados en el TESE con semillas de trigo, tanto el diclofenaco no tratado como los productos de degradación obtenidos con *T. versicolor* no afectaron la germinación. De hecho, el crecimiento de las raíces fue comparable al observado en el control con agua destilada. Este resultado es especialmente relevante porque sugiere que, al menos para este organismo de prueba, los productos de degradación no representan un riesgo mayor que el compuesto original.

Este hallazgo abre la puerta al uso del hongo inmovilizado como tratamiento complementario para remover CE de las aguas residuales. Así, un hongo que en la naturaleza descompone troncos y restos de madera en los bosques podría convertirse en un aliado inesperado para mejorar la calidad a los ríos y lagos que reciben las aguas residuales, protegiendo a los ecosistemas acuáticos y los organismos que dependen de ellos.

Perspectivas y retos

Los resultados que hemos obtenido en el TESE son prometedores, y posicionan a *T. versicolor* como un aliado prometedor frente a los CE, aunque el camino del laboratorio a una aplicación real todavía tiene retos por delante. En nuestro caso, aún falta evaluar cómo se comporta el hongo a mayor escala y en aguas residuales reales, más allá de las condiciones controladas del reactor probado hasta ahora. También es necesario evaluar si el soporte donde crece el hongo puede reutilizarse varias veces y cómo podría integrarse a las plantas de tratamiento que ya existen, además de ampliar las pruebas de toxicidad de los productos de degradación a otros organismos, incluyendo especies acuáticas como peces o crustáceos. Resolver estos retos podría convertir a este hongo, que en la naturaleza descompone

madera, en una herramienta real para devolver la salud a los ríos y lagos de México.

La dificultad para pasar del laboratorio a la aplicación real no es exclusiva del diclofenaco ni de *T. versicolor*. Una revisión reciente sobre el uso de biomasa (plantas, algas o residuos agrícolas) para tratar agua residual señala que, aunque cada vez hay más estudios que reportan resultados prometedores en el laboratorio, muy pocas de estas tecnologías han llegado a aplicarse realmente en plantas de tratamiento [9], principalmente por la dificultad de competir con la microbiota nativa del agua.

Frente a este panorama, la evidencia disponible para *T. versicolor* es alentadora. En algunos países ya se ha probado en reactores piloto, tratando agua residual hospitalaria real, sin esterilizar, durante casi tres meses seguidos, logrando eliminar una amplia variedad de fármacos pese a la competencia con las bacterias nativas del agua [10]. Resolver esta competencia microbiana, junto con seguir reduciendo los costos de producción del hongo en el laboratorio (algo que ya se ha logrado disminuir de forma importante), será clave para acercar esta tecnología a una planta de tratamiento real.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Se utilizaron herramientas de inteligencia artificial únicamente para apoyar la corrección de ortografía, estilo y mejora de la redacción del presente manuscrito, así como para la generación de la Figura 1, conforme a las normas de la Revista de divulgación científica iBIO. El contenido científico, los datos y las conclusiones presentadas son responsabilidad exclusiva de los autores.

Referencias

- [1] Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>
- [2] Böger, B., Surek, M., de O Vilhena, R., Fachi, M. M., Junkert, A. M., Santos, J. M., & Pontarolo, R. (2021). Occurrence of antibiotics and antibiotic resistant bacteria in subtropical urban rivers in Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123448. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123448>
- [3] Torres, A., Rodríguez, H. A., & Ayala, M. (2023). Contaminantes emergentes en México: panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 26. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.590>
- [4] Acuña-Bedoya, J. D., Borja-Maldonado, F., Herrera-Domínguez, M., & Zavala, M. Á. L. (2025). Current situation of emerging contaminants in Mexican waters and treatment perspectives. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 46, 100636. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100636>
- [5] Wojcieszynska, D., Łagoda, K., & Guzik, U. (2023). Diclofenac biodegradation by microorganisms and with immobilised systems—a review. *Catalysts*, 13(2), 412. <https://doi.org/10.3390/catal13020412>
- [6] Bound, J. P., & Voulvoulis, N. (2005). Household disposal of pharmaceuticals as a pathway for aquatic contamination in the United Kingdom. *Water Health*, 3(4), 455–463. <https://doi.org/10.1289/ehp.8315>
- [7] Oviedo-Gómez, D. G. C., Galar-Martínez, M., García-Medina, S., Razo-Estrada, C., & Gómez-Oliván, L. M. (2010). Diclofenac-enriched artificial sediment induces oxidative stress in *Hyalella azteca*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 29(1), 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2009.09.004>
- [8] Dixon D. Turkeytail Fungus [fotografía]. Wikimedia Commons; 2023. Licencia CC BY-SA 2.0. Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=132849101>
- [9] Trejo-Caballero, M.E., Elizalde-Mata, A., Guardado-Ruíz, E., González-Reyna, M.A., & Estevez, M. (2026). Biomass for contaminant removal: A critical review of misconceptions, realities, and the lab-to-industry gap. *Separation and Purification Technology*, 394, 137431. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.137431>
- [10] Mir-Tutusa, J. A., Parladé, E., Villagrasa, M., Barceló, D., Rodríguez-Mozaz, S., Martínez-Alonso, M., & Caminal, G. (2019). Long-term continuous treatment of non-sterile real hospital wastewater by *Trametes versicolor*. *Journal of Biological Engineering*, 13(1), 47. <https://doi.org/10.1186/s13036-019-0179-y>