

# NUEVOS ENFOQUES DE TECNOLOGÍAS HÍBRIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE MICROCONTAMINANTES DE AGUA RESIDUAL

ULISES DURÁN, DENISSE SERRANO,  
PERLA A. GONZÁLEZ TINEO Y NANCY E. NACIMBA

Los Fármacos y Productos de Cuidado Personal (FPCP), plaguicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados son ampliamente utilizados por la sociedad moderna. Estas sustancias son desechadas como residuos al ambiente, y son catalogadas como “microcontaminantes” o “contaminantes emergentes”, tanto por sus bajas concentraciones (en el orden de ng/L a µg/L), como por la dificultad para ser detectadas en el ambiente. Su persistencia, baja biodegradabilidad y su capacidad para provocar interacción sinérgica les confiere un potencial elevado para alterar el equilibrio ecológico e incidir en la salud pública. Hay evidencias de que algunos son bioactivos para seres humanos, mamíferos, peces e invertebrados,

debido a que su presencia en las descargas urbanas provoca: a) toxicidad crónica en mamíferos, b) disrupción endócrina en peces, c) resistencia de microorganismos a antibióticos, y d) efectos carcinógenos en organismos acuáticos. Por otro lado, en México las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) tradicionales no los remueven, sólo los dispersan en los ecosistemas acuáticos. Adicionalmente, por su compleja estructura y sus características recalcitrantes, su paso por las PTAR puede generar metabolitos más tóxicos y persistentes que el microcontaminante original (Lapworth *et. al.*, 2012). Esta problemática, ha motivado el desarrollo de tecnologías híbridas que eliminen eficientemente los microcontaminantes del agua residual. Por tanto, es importante abordar la problemática ocasionada por estos contaminantes, describir lo que ocasiona su persistencia en el ambiente y proporcionar un panorama general de algunas de las nuevas tecnologías para su tratamiento.

Los microcontaminantes han provocado una creciente preocupación en México, debido a que sus descargas en el ambiente no están reguladas por normas oficiales y el conocimiento acerca de su destino es muy limitado. La Figura 1 muestra su distribución y cómo son diseminados en agua superficial, subterránea, océanos y suelos por las PTAR (Balakrishna *et. al.*, 2017).

Tabla 1. Clasificación y usos de diversos microcontaminantes (Luo *et. al.*, 2014).

| Categoría                                       | Clase                   | Ejemplos  | Usos                                      | Medios de exposición   |
|---|-------------------------|---|---|--|
| Plaguicidas                                     | Organoclorados          | DDT, Aldrín, Endrín   | Insecticida                               | Descargas domésticas y de la agricultura. Lixiviación de suelos                      |
|   | Organofosforados        | Paratión, Diazinon, Malation  | Herbicidas                                |  |
|   | Piretroides             | Resmetrina, Aletrina,   | Plaguicida                                |  |
|   | Carbamatos              | Decametrina   |   |  |
|   | Bipridilos              | Aldicarb, Carbofuran, Carbaril  |   |  |
| Aditivos industriales                           | Retardantes             | Tetrabromobisfenol A,   | Recubrimientos                            | Descargas domésticas e industriales  |
|   | Bromados y fosfatados   | Hexabromociclododecano  | Retardantes,                              |  |
|   | Parafinas cloradas      | y Difenil-éteres  | Plastificantes,                           |  |
|   | Compuestos perfluorados | polibrominados  | Selladores                                |  |
|   | Surfactantes            | Sulfonato de perfluorooctano, Perfluorooctanoato Alquilfenolpolietoxilado | Antiadherentes, Detergentes, Lubricantes, |  |
| Fármacos y productos de cuidado personal (FPCP) | Analgésicos             | Diclofenaco, Naproxeno  | Médico                                    | Descargas y desechos hospitalarios, domésticos y pecuarios. Escorrentía de afluentes |
|   | Antihipertensivos       | Atenolol, Metoprolol  | Pecuario                                  |  |
|   | Antibióticos            | Tetraciclinas, Macrólidos   | Recreativo                                |  |
|   | Hormonas                | Testosterona, Cortisona,  |   |  |
|   | Drogas                  | Cafeína, Nicotina, Cocaína,   |   |  |
|   | Cuidado personal        | Benzofenonas, Compuestos aromáticos lipofílicos                           |   |  |

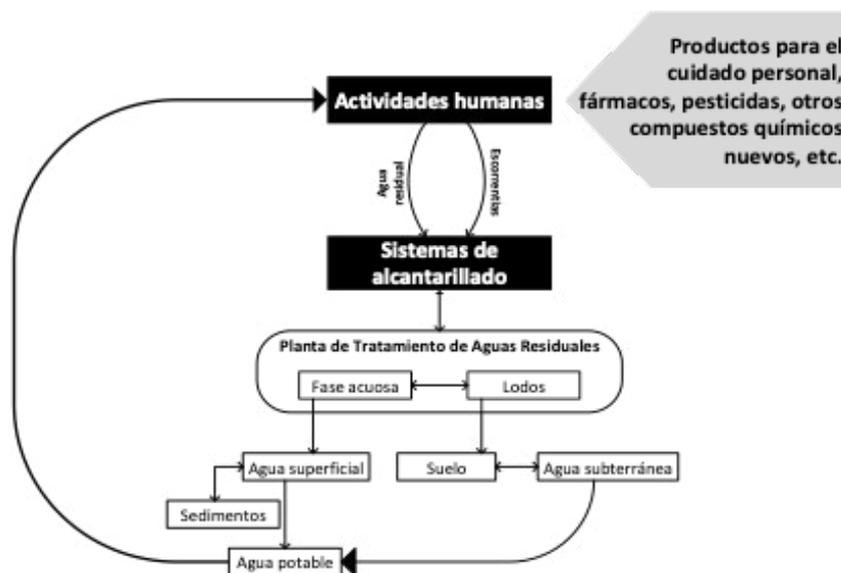


Figura 1. Distribución de los microcontaminantes en el ambiente

## Propiedades fisicoquímicas de los microcontaminantes en el ambiente

Los microcontaminantes tienen propiedades muy variadas, y su conocimiento es un factor fundamental para su tratamiento y eliminación. Éstos poseen características muy diferentes entre sí; por lo que, es necesario conocer los parámetros como el coeficiente de partición de octanol-agua ( $\log K_{ow}$ ), el coeficiente de partición líquido-sólido ( $K_d$ ) y la constante de disociación ácida ( $pK_a$ ), para determinar cómo podrían ser tratadas las diferentes matrices en las que se encuentran (Verlicchi y Zambello, 2015). En las PTAR, las condiciones de operación como la aireación, el pH y el tiempo de residencia hidráulico, pueden optimizarse mediante un claro conocimiento de estos parámetros, y así, mejorar la eficiencia de eliminación de los microcontaminantes (Shishir *et al.*, 2011).

## Sistemas híbridos de eliminación de microcontaminantes

Los sistemas híbridos presentan diferentes configuraciones en las que se acoplan tecnologías fisicoquímicas, electroquímicas y biológicas que en conjunto favorecen la eliminación de los microcontaminantes. Las tecnologías biológicas pueden incorporar procesos anaerobios/anóxicos/aerobios para incrementar la diversidad metabólica, también, pueden hacer uso de soportes para la inmovilización de biopelículas de

diversos microorganismos (bacterias, hongos y protozoos) en las que se genera un ambiente protegido contra agentes tóxicos e inhibitorios (Bassin y Dezotti, 2018). Estos sistemas se han aplicado exitosamente en el tratamiento de efluentes con presencia de fenoles, compuestos farmacéuticos y plaguicidas, incrementando su eliminación del agua residual hasta 90%. En contraste, los procesos aerobios y anaerobios convencionales son poco eficaces, ya que eliminan menos de 20% de los microcontaminantes presentes en los influentes (Alvariño *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2017). Por otro lado, las tecnologías fisicoquímicas y electroquímicas son una forma eficiente de remover microcontaminantes, sin embargo, el costo de su implementación es alto y algunos de ellos podrían producir intermediarios tóxicos. Con base en esto, los esfuerzos para remover microcontaminantes se centran en tecnologías híbridas.

En el grupo de investigación, conformado por académicos y estudiantes del Instituto de Ingeniería de la UNAM y del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), se ha estudiado a nivel laboratorio la eliminación de antibióticos presentes en agua residual porcina en condiciones anaerobias y por sorción con carbón activado granular (Nacimba, 2021). Mediante técnicas de biología molecular, se identificaron las poblaciones microbianas responsables de la biodegradación de los contaminantes, además, se desarrollaron modelos de predicción funcional del potencial de eliminación de macrocontaminantes y antibióticos (Gonzalez-Tineo *et al.*, 2020). Posteriormente,

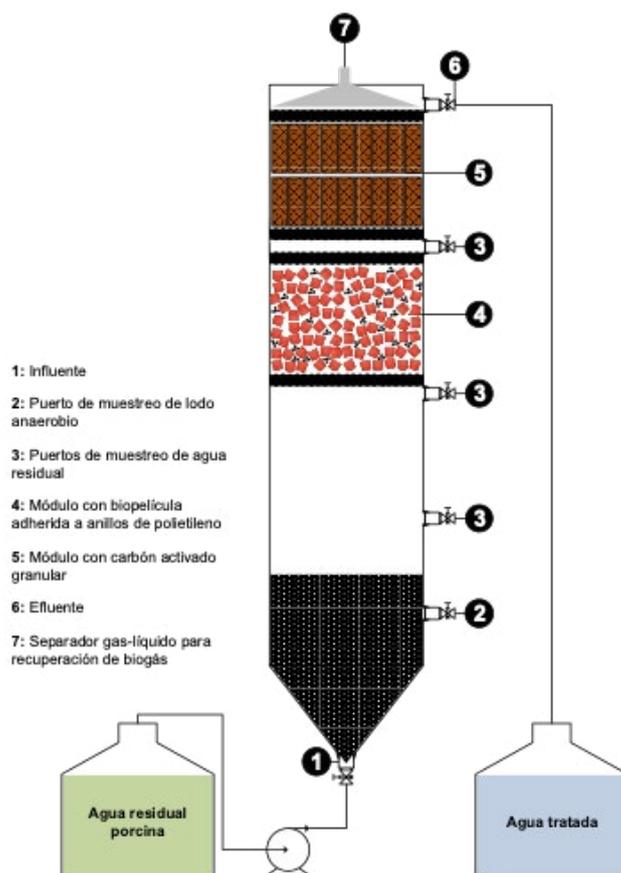


Figura 2. Diagrama esquemático del reactor anaerobio híbrido

los resultados obtenidos se utilizaron para el diseño y construcción de un sistema anaerobio híbrido a escala piloto para tratar agua residual porcina que contenía materia orgánica (500-5000 mg DQO/L), nutrientes (10-100 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L y 1-10 mg P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L) y antibióticos (oxitetraciclina, tetraciclina y tilosina) en niveles traza (≤ 100 µg/L).

La figura 2 muestra la configuración del reactor híbrido anaerobio, que consistió en tres módulos: el primero funcionó como un reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) convencional, el segundo contenía una biopelícula anaerobia adherida a un lecho empacado de anillos de polietileno y, el tercero estaba empacado con carbón activado granular. El reactor operó bajo condiciones mesofílicas (30 °C), a un pH de 7 y alimentado con agua residual porcina a tres Cargas Orgánicas Volumétricas: 3.26, 4.02 y 10.14 kg DQO/m<sup>3</sup>·d.

En todas las cargas orgánicas probadas, el reactor híbrido logró reducir: materia orgánica (>95%) en el

módulo UASB, nutrientes (>90%) en el módulo de lecho empacado y se obtuvieron altas eficiencias de eliminación de los antibióticos (>99%), tanto por biodegradación en los dos primeros módulos como por sorción en el módulo de carbón activado.

### Conclusiones

Ante el descubrimiento de una gran cantidad de microcontaminantes en diferentes matrices ambientales, se ha demostrado que los sistemas de tratamiento convencionales no logran eliminar estos componentes, convirtiéndose en su principal medio de propagación en los ecosistemas. Las tecnologías híbridas son una opción viable para el tratamiento eficaz del agua residual, por lo que es necesario seguir estudiando y desarrollando estos sistemas para extender su aplicación a otros compuestos.

# COORDINACIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

## Agradecimientos

Agradecemos el invaluable apoyo de la Dra. Susana Saval Bohórquez y la Mtra. Tonantzin Ramírez Pérez para la cuantificación de los antibióticos en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Esta investigación fue financiada por el proyecto APN2016-2737, del Fondo CONACyT para el desarrollo de proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales. |

## Contacto

Ulises Durán Hinojosa, e-mail: UDuranH@iingen.unam.mx

## Referencias

- Ahmed, M. B.; Zhou, J. L.; Ngo, H. H.; Guo, W.; Thomaidis, N. S. y Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: a critical review. *Journal of hazardous materials*. 323: 274-298.
- Alvariño, T.; Komesli, O.; Suarez, S.; Lema, J. M. y Omil, F. (2016). The potential of the innovative SeMPAC process for enhancing the removal of recalcitrant organic micropollutants. *Journal of hazardous materials*. 308: 29-36.
- Balakrishna, K.; Rath, A.; Praveenkumarreddy Y.; Guruge, K. S. y Subedi, B. (2017). A review of the occurrence of pharmaceuticals and personal care products in Indian water bodies. *Ecotoxicology and environmental safety*. 137: 113-120.
- Bassin, J. P. y Dezotti, M. (2018). Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). *In Advanced Biological Processes for Wastewater Treatment*. Springer, Cham: 37-74.
- Gonzalez-Tineo, P. A.; Durán-Hinojosa, U.; Delgadillo-Mirquez, L. R.; Meza-Escalante, E. R.; Gortáres-Moroyoqui, P.; Ulloa-Mercado, R. G. y Serrano-Palacios, D. (2020). Performance improvement of an integrated anaerobic-aerobic hybrid reactor for the treatment of swine wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 34, 101164.
- Lapworth, D. J.; N. Baran y Stuart, R.S. (2012). Ward, Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*. 163: 287-303.
- Luo, Y.; Jiang, Q.; Ngo, H. H.; Nghiem, L. D.; Hai, F. I.; Price, W. E. y Guo, W. (2015). Evaluation of micropollutant removal and fouling reduction in a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system. *Bioresource technology*. 191: 355-359.
- Nacimba, N. E. (2021). Influencia de tres antibióticos de uso veterinario en la remoción de macro y micro contaminantes de agua residual porcícola. *Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Shishir, K. B.; Hyeong, W. K.; Jeong-Eun, O. C. y Hung-Suck, P. (2011). Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*. 409 (2011):4351-4360.
- Verlicchi, P. y Zambello, E. (2015). Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: occurrence and environmental risk in the case of application on soil-a critical review. *Science of the Total Environment*. 538:750-767.