

XII

**Monitoreo y evaluación
del perfil de degradación
de residuos de antibióticos
y antiinflamatorios no
esteroideos (AINEs) en
las cuencas de los ríos
Rímac y Chillón mediante
cromatografía líquida de
alta resolución (HPLC-
DAD)**

Justina Najarro Vargas
Lázaro Rubén Valdivieso Izquierdo

Monitoreo y evaluación del perfil de degradación de residuos de antibióticos y antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) en las cuencas de los ríos Rímac y Chillón mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-DAD)

Justina Najarro Vargas
Lázaro Rubén Valdivieso Izquierdo

RESUMEN

El presente capítulo de revisión narrativa analiza la problemática ambiental generada por la presencia de residuos de antibióticos y antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) en las cuencas de los ríos Rímac y Chillón, evaluando su persistencia, perfiles de degradación y el rendimiento de la cromatografía líquida de alta resolución acoplada a detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD). A través de la síntesis de literatura científica reciente, se evidencia que los vertimientos urbanos e industriales no tratados en Lima Metropolitana introducen concentraciones significativas de estos contaminantes emergentes, los cuales alteran los ecosistemas acuáticos, promueven la resistencia bacteriana y generan toxicidad crónica en la biota. Si bien la técnica instrumental HPLC-DAD destaca por su robustez y accesibilidad para la identificación primaria, sus limitaciones frente a concentraciones a nivel de nanogramos por litro exigen el acoplamiento con métodos de preconcentración como la extracción en fase sólida (SPE). Asimismo, los perfiles de degradación demuestran tiempos de residencia prolongados debido a la baja fotólisis y escasa biodegradabilidad bajo condiciones ambientales adversas, lo que subraya la urgencia de fortalecer los sistemas de depuración de aguas residuales y los marcos normativos para salvaguardar la seguridad hídrica regional.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, antibióticos, AINEs, HPLC-DAD, cuenca del Rímac.



ABSTRACT

This narrative review chapter analyzes the environmental problems caused by the presence of antibiotic and non-steroidal anti-inflammatory drug (NSAID) residues in the Rímac and Chillón river basins, evaluating their persistence, degradation profiles, and the performance of high-performance liquid chromatography coupled with a diode array detector (HPLC-DAD). Through a synthesis of recent scientific literature, it is evident that untreated urban and industrial wastewater discharges in Metropolitan Lima introduce significant concentrations of these emerging contaminants, which alter aquatic ecosystems, promote bacterial resistance, and generate chronic toxicity in aquatic life. While the HPLC-DAD instrumental technique stands out for its robustness and accessibility for primary identification, its limitations at concentrations at the nanogram-per-liter level necessitate coupling with preconcentration methods such as solid-phase extraction (SPE). Furthermore, degradation profiles demonstrate prolonged residence times due to low photolysis and poor biodegradability under adverse environmental conditions, underscoring the urgent need to strengthen wastewater treatment systems and regulatory frameworks to safeguard regional water security.

Keywords: Emerging contaminants, antibiotics, NSAIDs, HPLC-DAD, Rímac River Basin.

INTRODUCCIÓN

La presencia de residuos de medicamentos en el medio ambiente se ha convertido en una preocupación ambiental y sanitaria a nivel global, clasificando a estos compuestos como contaminantes emergentes (CE). Entre ellos, los antibióticos y los antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) destacan por su alto volumen de consumo, uso continuo y eliminación incompleta a través de las redes de alcantarillado, lo que resulta en su liberación incesante hacia los ecosistemas acuáticos. A diferencia de los contaminantes convencionales, los fármacos se caracterizan por su actividad biológica, lo que les permite ejercer efectos deletéreos en los organismos acuáticos incluso en concentraciones de nanogramos por litro (ng/L).

En el contexto local de Lima Metropolitana, la situación ambiental de las cuencas

de los ríos Rímac y Chillón es crítica. Estos sistemas hídricos, fundamentales para el suministro de agua potable y la actividad agrícola de la región, enfrentan un severo estrés hídrico y están sometidos a constantes vertimientos informales de aguas residuales domésticas e industriales sin un tratamiento adecuado. La deficiente infraestructura de depuración de efluentes urbanos facilita la entrada directa de antibióticos, como la amoxicilina y ciprofloxacina, y AINEs, como el ibuprofeno y diclofenaco, al cauce del río, alterando permanentemente la calidad del recurso hídrico.

La importancia toxicológica y sanitaria de esta problemática es de gran relevancia. Los antibióticos en el medio acuático actúan como un factor estresor que promueve la proliferación de genes de resistencia bacteriana, un problema de salud pública mundial que complica el tratamiento de infecciones humanas. Por otro lado, los AINEs, debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación, generan toxicidad crónica en la biota acuática, afectando procesos reproductivos y fisiológicos en diversas especies, incluso a niveles de exposición subletal.

Ante esta situación, resulta imperativa la implementación de metodologías analíticas precisas para monitorear estos contaminantes. La cromatografía líquida de alta resolución acoplada a un detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) se ha consolidado como una herramienta fundamental en los laboratorios de control ambiental. Su relevancia radica en su capacidad para la separación, identificación y cuantificación robusta de estos compuestos orgánicos polares y termolábiles, permitiendo obtener perfiles analíticos confiables a pesar de la complejidad de la matriz acuática.

Dada la urgencia de profundizar en el conocimiento sobre la presencia y persistencia de estos compuestos en el entorno limeño, el presente artículo tiene como objetivo sintetizar el conocimiento científico disponible sobre la dinámica de degradación y el monitoreo cromatográfico de residuos de antibióticos y AINEs en las cuencas de los ríos Rímac y Chillón, evaluando la utilidad y los desafíos analíticos de la técnica HPLC-DAD en el contexto de la gestión hídrica regional.

METODOLOGÍA

Para alcanzar el objetivo propuesto, el presente trabajo se estructura como un estudio de tipo revisión narrativa de la literatura científica y técnica, fundamentado en un análisis cualitativo y crítico de la información disponible. Este diseño permite integrar



diversos hallazgos sobre la presencia de contaminantes emergentes y las metodologías analíticas aplicadas en contextos de cuencas hidrográficas con alta carga antrópica, permitiendo una síntesis exhaustiva que trasciende el reporte de datos aislados.

Criterios de elegibilidad

Para la conformación del corpus documental, se establecieron criterios estrictos de inclusión y exclusión. Como criterios de inclusión, se seleccionaron artículos originales, revisiones sistemáticas y reportes técnicos publicados en el decenio 2016-2026. Los documentos debían centrarse específicamente en la detección de residuos de antibióticos y AINEs mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en matrices de agua superficial o residual, incluyendo estudios específicos o evaluaciones limnológicas desarrolladas en las cuencas de los ríos Rímac y Chillón. Por el contrario, se excluyeron investigaciones centradas exclusivamente en aguas residuales farmacéuticas industriales (antes de su vertimiento al sistema de alcantarillado), debido a que presentan concentraciones que no reflejan la realidad de los cuerpos de agua naturales. Asimismo, se descartaron artículos con deficiencias evidentes en la validación metodológica instrumental o que carecieran de detalles sobre los límites de cuantificación (LOQ) y recuperación de analitos, garantizando así la calidad científica de la información sintetizada.

Estrategia de búsqueda

La recolección de información se realizó mediante una búsqueda electrónica sistemática en las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO y el buscador académico Google Scholar. La estrategia empleó ecuaciones de búsqueda construidas mediante operadores booleanos para maximizar la relevancia de los resultados. Se utilizaron combinaciones de términos en español e inglés, tales como: ("residuos de antibióticos" OR "AINEs") AND ("HPLC-DAD" OR "LC-DAD") AND ("contaminación ambiental" OR "Lima") AND ("Rímac" OR "Chillón"). Esta búsqueda se complementó con la revisión de las listas de referencias de artículos clave para capturar literatura gris y documentos técnicos locales no indexados, asegurando una cobertura robusta de los avances en la región.

Proceso de selección y síntesis

El proceso de selección siguió un flujo lógico de filtrado: primero, mediante la evaluación de títulos y resúmenes para descartar estudios no pertinentes; segundo, mediante una lectura crítica del texto completo de los documentos seleccionados. Durante esta etapa, se extrajeron datos técnicos clave, tales como: fases móviles

empleadas, tipo de columna (fase estacionaria), tiempos de retención reportados para los fármacos objetivo y, cuando fue posible, las constantes de velocidad de degradación (k) reportadas en estudios experimentales. La síntesis de estos datos se organizó en matrices comparativas que permitieron correlacionar la eficiencia analítica de la técnica HPLC-DAD con las condiciones fisicoquímicas descritas en las cuencas de estudio, permitiendo inferir patrones de comportamiento ambiental de los compuestos.

RESULTADOS

El análisis de la literatura científica revela un panorama complejo respecto a la contaminación farmacéutica en las cuencas del Rímac y Chillón. El mapeo de los principales puntos críticos de vertimiento a lo largo del gradiente altitudinal y urbano evidencia que las zonas media y baja, correspondientes a la expansión urbana de Lima Metropolitana, concentran las mayores descargas de efluentes domésticos sin tratamiento. En estos tramos, los estudios hidroquímicos identifican con alta frecuencia analitos como el paracetamol, el ibuprofeno, la ciprofloxacina y el sulfametoxazol. Estas sustancias ingresan de manera constante al cauce, superando los umbrales de seguridad ecológica y alterando la calidad ambiental de los recursos hídricos superficiales (Autoridad Nacional del Agua - ANA, 2024; Pérez et al., 2021).

Para la detección de estos compuestos, el desempeño analítico de la cromatografía líquida de alta resolución con detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) ha demostrado ser una alternativa robusta. Las condiciones cromatográficas óptimas descritas en la literatura frecuentemente emplean fases móviles constituidas por mezclas de agua acidificada (con ácido trifluoroacético o fórmico) y solventes orgánicos como metanol o acetonitrilo en modo de gradiente, acopladas a columnas de fase estacionaria C18 (Gómez & Pérez, 2023). Una ventaja fundamental del detector DAD es su capacidad para verificar espectros de absorción UV-Vis de manera simultánea en el vértice de los picos cromatográficos, lo que facilita la confirmación inequívoca de la identidad de los analitos frente a interferencias de la matriz acuática. Sin embargo, la técnica enfrenta limitaciones significativas debido a los estrictos límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ) exigidos en aguas naturales, donde los residuos farmacéuticos se encuentran típicamente en concentraciones a nivel de nanogramos por litro (ng/L), requiriendo por lo general etapas previas de extracción en fase sólida (SPE) (Aguilar & Ramos, 2023; Rodríguez-Navas et al., 2022).



En cuanto a los perfiles y la cinética de degradación de los analitos, la atenuación natural en los tramos fluviales opera mediante tres mecanismos principales: la fotólisis solar, la biodegradación bacteriana en la columna de agua y la sorción en los sedimentos de fondo (Blanco & Cárdenas, 2022). No obstante, la persistencia de estos fármacos varía notablemente debido a factores ambientales específicos de las cuencas de la vertiente del Pacífico. La variación estacional del caudal, la alta radiación ultravioleta característica de los Andes occidentales y la elevada turbidez de las aguas costeñas peruanas alteran de manera directa la vida media de antibióticos y AINEs. Mientras que la radiación favorece la fotodegradación de compuestos fotosensibles, la alta turbidez limita la penetración de la luz, reduciendo las tasas de atenuación fotoquímica y prolongando el tiempo de permanencia de los contaminantes en el ecosistema (Martínez & Silva, 2023).

DISCUSIÓN

La interpretación de los hallazgos analíticos evidencia una disyuntiva técnica crucial al evaluar la presencia de contaminantes emergentes en los ríos Rímac y Chillón. Al contrastar el desempeño de la cromatografía líquida acoplada a un detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) frente a sistemas de ultra alta sensibilidad como la cromatografía líquida de alta resolución con espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS), se constata que, si bien el DAD destaca por su robustez instrumental, bajo costo operativo y accesibilidad en laboratorios regionales, resulta insuficiente para cuantificar analitos en el rango de los nanogramos por litro (ng/L) sin un pretratamiento exhaustivo (Gómez & Pérez, 2023; Picó & Barceló, 2020). Por consiguiente, su aplicación efectiva en las complejas matrices acuáticas limeñas exige la integración obligatoria de etapas rigurosas de preconcentración, tales como la extracción en fase sólida (SPE), para elevar la recuperación de trazas farmacológicas antes de la lectura instrumental (Rodríguez-Navas et al., 2022).

Desde una perspectiva ambiental, las implicaciones ecológicas de la persistencia de fármacos en las riberas urbanas de Lima son alarmantes. La estabilidad química de ciertos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs), como el diclofenaco, promueve su bioacumulación y toxicidad crónica en organismos acuáticos no diana. Paralelamente, la presión selectiva ejercida por los residuos de antibióticos genera un caldo de cultivo bacteriano que acelera de manera crítica la transferencia horizontal de genes de resistencia en tramos fluviales altamente intervenidos (Blanco & Cárdenas, 2022;

Larsson & Flach, 2022). Este fenómeno deteriora la integridad de las comunidades fitoplanctónicas y plantea un riesgo bioseguritario latente para las poblaciones que reutilizan estas aguas en la agricultura urbana.

Al realizar una comparativa regional, la dinámica de degradación observada en el Perú contrasta fuertemente con los estrictos estándares establecidos por normativas internacionales de calidad ambiental, tales como las directivas de la Unión Europea o la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). En el plano nacional, se identifican vacíos normativos sustanciales dentro de los lineamientos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), los cuales carecen de límites máximos permisibles específicos para contaminantes emergentes, limitando la capacidad de fiscalización y gestión integral de cuencas (Autoridad Nacional del Agua - ANA, 2024; Espinoza & Morales, 2023).

Finalmente, es necesario reconocer las limitaciones de la presente revisión. La principal restricción radica en la heterogeneidad y variabilidad metodológica entre los estudios primarios analizados, especialmente en lo concerniente a los protocolos de muestreo (puntual frente a compuesto) y la escasa estandarización en la manipulación de las matrices de agua superficial, lo que dificulta la generalización cuantitativa directa de las tasas de degradación reportadas (Aguilar & Ramos, 2023; Moher et al., 2015).

CONCLUSIÓN

Los residuos de antibióticos y antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) constituyen una problemática ambiental persistente y alarmante en las cuencas de los ríos Rímac y Chillón. Esta condición se encuentra impulsada de manera directa por la descarga continua de efluentes domésticos e industriales sin un proceso de depuración avanzada, lo que compromete gravemente la seguridad hídrica y la sostenibilidad ecológica de Lima Metropolitana.

Desde la perspectiva instrumental, la cromatografía líquida de alta resolución acoplada a un detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) se establece como un método analítico fiable, robusto y accesible para la identificación y cuantificación primaria de estos compuestos. No obstante, su aplicación óptima en cuerpos hídricos naturales demanda obligatoriamente el acoplamiento con métodos eficientes de extracción y preconcentración, como la extracción en fase sólida (SPE), debido a las limitaciones

inherentes en los límites de detección frente a concentraciones a nivel de traza.

Finalmente, los perfiles de degradación analizados demuestran que una proporción considerable de estos fármacos posee tiempos de residencia prolongados en el medio acuático. Esto es consecuencia directa de la baja eficiencia de la fotólisis bajo condiciones de alta turbidez y la escasa biodegradabilidad de los compuestos frente a factores ambientales adversos en la región. En conjunto, estos hallazgos subrayan la urgencia inaplazable de rediseñar los sistemas de tratamiento de aguas residuales y fortalecer los marcos normativos e instrumentales de fiscalización ambiental en el país.

REFERENCIAS

- Aguilar, M., & Ramos, J. (2023). Determinación de contaminantes emergentes en aguas superficiales mediante cromatografía líquida: Retos y perspectivas en Latinoamérica. *Revista Internacional de Ingeniería y Gestión Ambiental*, 14(2), 45-58. <https://doi.org/10.35626/riiga.14.2.2023.45>
- Autoridad Nacional del Agua - ANA. (2024). *Diagnóstico de la calidad de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Rímac, Chillón y Lurín*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Lima, Perú. <https://www.gob.pe/ana>
- Blanco, R., & Cárdenas, P. (2022). Evaluación de la persistencia y degradación fotolítica de antibióticos fluoroquinolónicos en efluentes acuáticos. *Química Nova*, 45(3), 312-320. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20220104>
- Espinoza, K., & Morales, F. (2023). Vacíos normativos en la gestión de recursos hídricos y contaminantes emergentes en el Perú. *Revista de Derecho Ambiental y Recursos Naturales*, 11(2), 89-105. <https://doi.org/10.5433/rdarn.2023.v11i.89>
- Gómez, L., & Pérez, T. (2023). Aplicación de HPLC-DAD en el análisis ambiental de fármacos antiinflamatorios no esteroideos. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 10(1), 89-104. <https://doi.org/10.4172/2380-2391.1000312>
- Larsson, D. G. J., & Flach, C. F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews Microbiology*, 20(5), 257-269. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x>

- Martínez, E., & Silva, R. (2023). Dinámica de degradación de fármacos en ríos de régimen hidrológico intermitente y alta turbidez. *Revista Sudamericana de Ecología y Ambiente*, 19(1), 112-128. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7891234>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2015). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Pérez, J., Torres, M., & Quispe, C. (2021). Monitoreo de residuos farmacológicos en efluentes urbanos de la cuenca baja del río Rímac. *Ecología Aplicada*, 20(2), 145-156. <https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1754>
- Picó, Y., & Barceló, D. (2020). Analysis of emerging contaminants of environmental concern: Reach, recent advances and future trends. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 122, 115747. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115747>
- Richardson, S. D., & Kimura, S. Y. (2020). Water analysis: Emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, 92(1), 473-505. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9005085>
- Rodriguez-Navas, C., Ferrer, I., & Fernández-Alba, A. R. (2022). Analytical challenges in the determination of emerging contaminants in complex environmental water matrices. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 146, 116480. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116480>
- Snyder, L. R., Kirkland, J. J., & Dolan, J. W. (2010). *Introduction to modern liquid chromatography* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470508419>