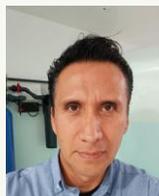




Resistencia antimicrobiana y aguas residuales hospitalarias: impacto ambiental y acciones de mitigación



Jorge Alberto Carballo-Juárez. Maestría en Farmacia Clínica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México; Facultad de Química Farmacéutica Biológica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. jcarballo@uv.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5202-3793>

Estudiante de la Maestría en Farmacia Clínica, posgrado adscrito a la Facultad de Química Farmacéutica Biológica (región Xalapa) de la Universidad Veracruzana. Experto en sistemas de tratamiento de agua.

Adolfo Sánchez-Flores. Cuerpo Académico 214 “Farmacología Clínica y Molecular, Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México.

e-mail: adosanchez@uv.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8417-247X>

Olga Lidia Valenzuela Limón. Maestría en Farmacia Clínica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México. Cuerpo Académico 214 “Farmacología Clínica y Molecular”, Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México. e-mail: ovalenzuela@uv.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8741-0760>

José Locía Espinoza. Maestría en Farmacia Clínica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México; Facultad de Química Farmacéutica Biológica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. E-mail: jlocia@uv.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4043-7616>

Cecilia Luz Balderas Vázquez. Ingeniería Biomédica, Anáhuac Veracruz, Campus Córdoba-Orizaba. Córdoba, Veracruz, México. e-mail: cecilia.balderas.v@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7418-2482>

Emma Virginia Herrera-Huerta*. Maestría en Farmacia Clínica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México. Cuerpo Académico 214 “Farmacología Clínica y Molecular”, Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz, México. e-mail: emherrerah@uv.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4045-1554>.

Resumen

La resistencia antimicrobiana (RAM) es una amenaza creciente para la salud pública y el medio ambiente. La eliminación inadecuada de antimicrobianos en aguas residuales hospitalarias contribuye a su presencia en cuerpos de agua, favoreciendo microorganismos resistentes. Este artículo examina la asociación entre la contaminación ambiental y la diseminación de la RAM, así como las limitaciones del marco normativo vigente en México. Se ofrece un análisis crítico de este vacío normativo y se plantean recomendaciones de acción frente a la resistencia antimicrobiana ambiental, desde una perspectiva conjunta de salud pública y sostenibilidad ambiental.

Palabras Clave

antimicrobianos, resistencia antimicrobiana, tratamiento de aguas residuales, normatividad ambiental.

Cite este artículo así:

APA: Carballo-Juárez, A. Sánchez-Flores, A. Valenzuela-Limón, O. Locía-Espinoza, J. Balderas-Vázquez, C. Herrera-Huerta, E. (2025). Resistencia antimicrobiana y aguas residuales hospitalarias: impacto ambiental y acciones de mitigación. *Quimiofilia*, 2025, 4, (1), 1-4.

MDPI y JACS: Carballo-Juárez, A.; Sánchez-Flores, A.; Valenzuela-Limón, O.; Locía-Espinoza, J.; Balderas-Vázquez, C.; Herrera-Huerta, E. *Quimiofilia*, 2025, 4, 1, 1-4.

DOI: <https://doi.org/10.56604/qfla20254114>

Recibido: 03 de abril 2025. **Aceptado:** 10 de junio 2025. **Publicado:** 21 de junio de 2025.

www.quimiofilia.com. ISSN: 2683-2364. Registro IMPI: 2052060
QUIMIOFILIA. Reserva de derechos al uso exclusivo 2022: 04-2019-062013201300-203



Introducción

La resistencia antimicrobiana (RAM) se define como la capacidad de un microorganismo para resistir los efectos de los antimicrobianos (ATM) y puede ser inherente o adquirida.¹ Los ATM incluyen antibióticos, antifúngicos, antivíricos, antipalúdicos o antihelmínticos, sustancias que inhiben o destruyen microorganismos, como bacterias, hongos, virus y parásitos.²

La RAM es un serio problema de salud pública tanto en el ámbito hospitalario como comunitario. Se estima que, de no tomar medidas preventivas y de contención como el vigilar la RAM en la salud humana y animal, promover el uso responsable de ATM o fomentar la investigación y métodos de diagnóstico,³ esta situación podría causar hasta 10 millones de muertes para el año 2050.⁴ La proliferación de bacterias resistentes a múltiples medicamentos (MDR, sus siglas en inglés) ha sido impulsada principalmente por el uso excesivo e inapropiado de ATM, y representa una amenaza creciente. En particular, se destaca la aparición de bacterias nosocomiales, conocidas como patógenos “ESKAPE”^{5,6} (Figura 1) resistentes a múltiples fármacos, las cuales han sido clasificadas como de “prioridad crítica” y “alta prioridad” para el desarrollo de tratamientos alternativos a nivel mundial.⁷



Figura 1. Bacterias ESKAPE. Elaboración propia

1. Giono-Cerezo, S.; Santos-Preciado, J.I.; Morfin-Otero, M.D.R.; Torres-López, F.J.; Alcántar-Curiel, M.D. Resistencia antimicrobiana. Importancia y esfuerzos por contenerla. *Gaceta médica de México*, **2020**, 156(2), 172-180. Epub 26 de mayo de 2021. DOI: <https://doi.org/10.24875/gmm.20005624>
2. Organización Panamericana de la Salud. (2019). Tratamiento de las enfermedades infecciosas 2020-2022 (8.ª ed.). OPS. DOI: <https://doi.org/10.37774/9789275321003>
3. Lazovski, J.; Corso, A.; Pasteran, F.; Monsalvo, M.; Frenkel, J.; Cornistein, W.; Corral, G.; Nacinovich, F. Estrategia de control de la resistencia bacteriana a los antimicrobianos en Argentina. *Revista Panamericana de Salud Pública*, **2017**, 41, e88. Recuperado de: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6660862/pdf/rpsp-41-e88.pdf>
4. Naghavi, M.; et al. Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: A systematic analysis with forecasts to 2050. *The Lancet*, **2024**, 404(10459), 1199–1226. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)01867-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)01867-1)
5. Mills, B.; Kiang, A.; Mohan, S.; Bradley, M.; Klausen, M. Riboflavin-vancomycin conjugate enables simultaneous antibiotic photo-release and photodynamic killing against resistant Gram-positive pathogens. *JACS Au*, **2023**, 3(11), 3014-3023. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacsau.3c00369>
6. Guevara Díaz, J.A.; Maldonado, M.R.; Valadez Padilla, D.E.; Muro Díaz, R.; Matsumoto Palomares, I.R. Resistencia bacteriana: Organismos del grupo ESKAPE. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología*, **2021**, 41(3), 111-117.

Desde el descubrimiento de la penicilina, se han desarrollado diversas familias de ATM con mecanismos de acción diversos.⁸ Lo anterior debido a que los microorganismos han desarrollado resistencia mediante tres mecanismos principales: a) disminución de la permeabilidad de la membrana, b) modificación o inactivación del fármaco y c) alteración del sitio blanco.⁹

La resistencia antimicrobiana y su efecto en la salud pública

La RAM amenaza la efectividad en la prevención y el tratamiento de infecciones por diversos patógenos, lo que representa un creciente desafío para la salud pública global y requiere acciones de todos los sectores gubernamentales y sociales. La falta de ATM eficaces también comprometería el éxito de intervenciones médicas como la cirugía mayor y la quimioterapia. Además, las infecciones causadas por microorganismos resistentes prolongan la enfermedad, aumentan la necesidad de pruebas diagnósticas y encarecen el tratamiento, elevando significativamente los costos de atención en comparación con las infecciones por microorganismos no resistentes.¹⁰

Para abordar el problema de la RAM, es fundamental adoptar el enfoque “One Health” (Una sola salud), establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que reconoce la conexión intrínseca y la interdependencia entre la salud humana, animal, vegetal y ambiental (Figura 2). La colaboración entre las disciplinas de medicina, veterinaria y medio ambiente, tanto a nivel local como global, es esencial para alcanzar una salud óptima para las personas, los animales y el planeta.¹¹

Agua residual hospitalaria como fuente de diseminación ambiental

Los hospitales consumen grandes cantidades de agua, que pueden variar entre 400 y 1200 litros al día por cada cama ocupada. Esto significa que generan volúmenes importantes de aguas residuales, las cuales contienen una mezcla de sustancias potencialmente peligrosas, como restos de medicamentos, desinfectantes, microorganismos dañinos y, en ocasiones, hasta elementos

- Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/357355210_Resistencia_bacteriana_organismos_del_grupo_Eskape#fullTextFileContent
7. Organización Mundial de la Salud. (2021). Orientaciones normativas de la OMS sobre las actividades integrales para la optimización de los antimicrobianos. Recuperado de: <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240025530>
 8. Oteo Iglesias, J. (2016). La resistencia a los antibióticos: la amenaza de las superbacterias. Los Libros de la Catarata; Instituto de Salud Carlos III. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/311533278_La_resistencia_a_los_antibioticos_La_amenaza_de_las_superbacterias
 9. Martínez-Trejo, A.; Ruiz-Ruiz, J.M.; González-Avila, L.U.; Saldaña-Padilla, A.; Hernández-Cortez, C.; Loyola-Cruz, M.A.; Castro-Escarpulli, G. Evasion of Antimicrobial Activity in *Acinetobacter baumannii* by Target Site Modifications: An Effective Resistance Mechanism. *Int. J. Mol. Sci.*, **2022**, 23(12), 6582. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23126582>
 10. Ramos Alvaríño, C. Aguas residuales generadas en hospitales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, **2008**, 29(2), 56–60. Recuperado de: <https://afam.org.ar/wp-content/uploads/aguas-residuales-generadas-en-hospitales.pdf>
 11. United Nations Environment Programme. (2023). Bracing for Superbugs: Strengthening environmental action in the One Health response to antimicrobial resistance. *Nairobi: United Nations Environment Programme*. Recuperado de: <https://www.unep.org/resources/superbugs/environmental-action>



radiactivos.¹⁰ Lamentablemente, en la mayoría de los casos, estas aguas se vierten directamente en el sistema de alcantarillado sin recibir tratamiento previo, lo que origina que los contaminantes y patógenos de origen hospitalario terminen en las plantas de tratamiento convencionales,^{12,13} contribuyendo a la propagación de la RAM en el medio ambiente.

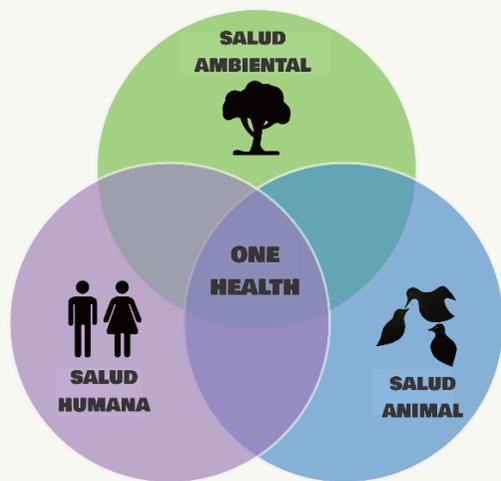


Figura 2. Enfoque “One Health”¹³

Como resultado, muchos de estos compuestos y microorganismos peligrosos llegan a los ecosistemas acuáticos, generando un problema ambiental que afecta no solo a la naturaleza, sino también a la salud pública.¹⁴ Las aguas residuales de hospitales, en particular, se consideran una fuente importante de patógenos y microorganismos resistentes a los ATM.¹⁵

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) ha propuesto un conjunto de opciones de gestión para abordar los efluentes y desechos generados en los establecimientos de salud. Estas medidas buscan reducir la diseminación de contaminantes asociados a la RAM y mitigar su impacto ambiental. Las principales acciones recomendadas son:¹¹

- Implantar programas rigurosos de higiene y prevención de infecciones en todas las operaciones clínicas.
- Garantizar la eliminación y el tratamiento seguro y sostenibles de medicamentos ATM y residuos peligrosos, por ejemplo, mediante la creación y fortalecimiento de programas de devolución “take-back”.

- Aplicar tratamientos in situ, de alta eficiencia y dirigidos a la RAM, a las aguas residuales hospitalarias para evitar su propagación al medio ambiente.
- Reforzar los programas de administración responsable de ATM (stewardship) y de prevención y control de infecciones con el fin de limitar la contaminación ambiental por agentes relacionados con la RAM.
- Promover la adquisición sostenible y la gestión racional (incluida la eliminación) de ATM por parte de los sistemas de atención sanitaria.

Cada vez que un hospital salva una vida, también genera aguas cargadas de medicamentos, microorganismos y químicos difíciles de eliminar. Si no se tratan adecuadamente, estos residuos terminan contaminando ríos, suelos y afectando la salud de todos. Los efluentes hospitalarios pueden contribuir entre un 0.2 a 65 % a la descarga total que llega a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) municipales,¹⁶ por ello, es indispensable establecer sistemas específicos como la oxidación avanzada con ozonización, nanofiltración o la ósmosis inversa que permitan reducir la carga iónica de los efluentes residuales de estas instalaciones.¹¹

En México, no existe actualmente una Norma Oficial Mexicana (NOM) que establezca la obligatoriedad de que las instalaciones hospitalarias cuenten con una PTAR adecuada para tratar sus efluentes, sin embargo, es importante resaltar lo que la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) establece en su artículo 121: “no podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local”.¹⁷

Sin lugar a dudas, lo considerado por la LGEEPA alude directamente a las administraciones municipales que son las encargadas de vigilar el adecuado funcionamiento de sus PTAR, muchas de las cuales no disponen de tecnología avanzada para eliminar fármacos y evitar su descarga a cuerpos de agua, sin embargo, es de imperante necesidad extender este requerimiento a las instalaciones hospitalarias para que, a través de sistemas más sofisticados, realicen el tratamiento de sus aguas residuales antes de verterlas a la red municipal de aguas negras.

Si los ATM y sus metabolitos logran llegar al medio ambiente, entrarán en contacto con los microorganismos resistentes, lo que representa un riesgo significativo, estos microorganismos pueden ingresar al ser humano a través de agua o alimentos, facilitando la

12. Muñoz, M.; García-Muñoz, P.; Pliego, G.; de Pedro, Z.M.; Zazo, J.A.; Casas, J.A.; Rodríguez, J.J. (2016). Tratamiento de aguas residuales hospitalarias mediante el proceso Fenton. *Universidad Autónoma de Madrid*. Recuperado de: <https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/tratamiento-de-aguas-residuales-hospitalarias-mediante-el-proceso-fenton>

13. Espinosa García-San Román, J.; Quesada-Canales, Ó.; Arbelo Hernández, M.; Déniz Suárez, S.; Castro-Alonso, A. Veterinary Education and Training on Non-Traditional Companion Animals, Exotic, Zoo, and Wild Animals: Concepts Review and Challenging Perspective on Zoological Medicine. *Veterinary Sciences*, **2023**, *10*(5), 357. <https://doi.org/10.3390/vetsci10050357>

14. Santos, J.L.; Aparicio, I.; Callejón, M.; Alonso, E. Occurrence of pharmaceutically active compounds during 1-year period in wastewaters from four

wastewater treatment plants in Seville (Spain). *J. Hazard. Mater.*, **2009**, *164*, 1509-1516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.073>

15. Baquero, F.; Martínez, J.; Cantón, R. Antibiotics and antibiotic resistance in water environments. *Curr. Opin. Biotechnol.*, **2008**, *19*, 260-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.05.006>

16. Castro-Pastrana, L.I.; Cerro-López, M.; Toledo-Wall, M.L.; Gómez-Oliván, L.M.; Saldívar-Santiago, M.D. Analysis of pharmaceuticals in wastewater of three hospitals in the city of Puebla, México. *Ingeniería del agua*, **2021**, *25*(1), 59-73. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13660>

17. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>



propagación de enfermedades difíciles de tratar.¹⁸ Derivado de lo anterior, sería interesante que, a través de cuerpos colegiados, comisiones o comités competentes se promueva la inclusión en la NOM-001-SEMARNAT-2021¹⁹ de límites específicos para ATM u otros fármacos de impacto ambiental en agua residuales. De igual modo catalogar estas moléculas como residuos peligrosos e incluirlas en la NOM-052-SEMARNAT-2005.²⁰

Resumen de las acciones de mitigación

La RAM no solo representa un problema de salud humana; también tiene un impacto profundo en el medio ambiente. Cuando se utilizan ATM de manera excesiva o inadecuada, estos medicamentos, junto con los microorganismos resistentes que generan, acaban introduciéndose en ecosistemas naturales como el agua, el suelo y la vida silvestre. El proceso ocurre a través de las aguas residuales, los desechos industriales y agrícolas, generando ambientes en los que estos microorganismos resistentes pueden multiplicarse y diseminarse. Para enfrentar los efectos ambientales de la RAM, resulta esencial considerar implementar las siguientes acciones propuestas que se resumen en la Figura 3.



Figura 3. Acciones de mitigación propuestas frente a la RAM ambiental. Elaboración propia.

Conclusión

La RAM ha dejado de ser un problema clínico exclusivo para convertirse en un desafío ambiental, sanitario y normativo que exige una respuesta coordinada. A lo largo del artículo se ha expuesto cómo los ATM presentes en las aguas residuales hospitalarias representan una amenaza creciente para los ecosistemas y la salud pública. En este contexto, urge la implementación de tecnologías de tratamiento avanzadas, el fortalecimiento de marcos regulatorios que exijan plantas de tratamiento en hospitales, y la adopción del enfoque "One Health", que articula los esfuerzos de los sectores salud, medio ambiente, académico y gubernamental. Solo así podremos reducir la carga ambiental de los ATM, contener la diseminación de la RAM y avanzar hacia un futuro donde nuestras decisiones estén guiadas por la corresponsabilidad y la sostenibilidad.

Agradecimiento

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento otorgado (1337545). Actualmente, esta institución se denomina Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), conforme a la reciente reestructuración institucional.

18. Organización Panamericana de la Salud. (2021). La resistencia antimicrobiana pone en riesgo la salud mundial. Recuperado de: <https://www.paho.org/es/noticias/3-3-2021-resistencia-antimicrobiana-pone-riesgo-salud-mundial>

19. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario

Oficial de la Federación. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

20. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2005). NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>