

# NANOMATERIALES VERSUS RESISTENCIA A LOS ANTIBIÓTICOS

## NANOMATERIALS VERSUS ANTIMICROBIAL RESITANCE

- (1) Rodrigo Vela Vázquez
- (1) \* Alejandro Escobedo-Morales
- (2) Umapada Pal
- (1) Eloina Cadena Torres
- (1) María Sebastiana Pedraza Chan

<https://orcid.org/0009-0004-8809-0131>  
<https://orcid.org/0000-0002-8701-8785>  
<https://orcid.org/0000-0002-5665-106X>  
<https://orcid.org/0009-0006-8683-1180>  
<https://orcid.org/0000-0003-1361-4493>

Año 10 No. 30

Recibido: 18/septiembre/2023

Aprobado: 15/abril/2024

Publicado: 10/septiembre/2024

(1) Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla, México.

(2) Instituto de Física “Luis Rivera Terrazas” Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla, México.

[rodrigo.vela@alumno.buap.mx](mailto:rodrigo.vela@alumno.buap.mx)  
[alejandro.escobedo@correo.buap.mx](mailto:alejandro.escobedo@correo.buap.mx)

[upal@ifuap.buap.mx](mailto:upal@ifuap.buap.mx)

[eloina.cadena@alumno.buap.mx](mailto:eloina.cadena@alumno.buap.mx)

[maria.pedrazachan@correo.buap.mx](mailto:maria.pedrazachan@correo.buap.mx)

## Resumen

Este artículo aborda la creciente problemática de la resistencia a los antimicrobianos disponibles que algunos patógenos han desarrollado, destacando cómo ciertos comportamientos de la población agravan esta situación en los ambientes acuáticos y terrestres. Así, la resistencia a los antimicrobianos (RAM) se ha convertido en una preocupación global, ya que las bacterias se adaptan y evolucionan para resistir los mecanismos de acción de los medicamentos diseñados para eliminarlas, lo que resulta en tratamientos cada vez menos efectivos y un aumento en la persistencia y propagación de enfermedades infecciosas. La RAM no solo compromete la salud humana, sino también afecta negativamente a los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad. Aquí, se destaca el papel de los avances tecnológicos, en particular, el desarrollo de nanomateriales para la degradación de antibióticos como una medida prometedora para combatir la contaminación por estas sustancias y combatir la RAM. Por otra parte, se proponen estrategias para minimizar el impacto ambiental de los fármacos, incluyendo el uso responsable de antibióticos en medicina y veterinaria, mejoras en la gestión de residuos, y el fomento de la investigación y desarrollo de alternativas más sostenibles para el control de patógenos. Finalmente, se enfatiza la necesidad de una acción colectiva y responsable para preservar la eficacia de los antibióticos, proteger la salud pública y asegurar la conservación de los ecosistemas para las futuras generaciones.

Palabras clave: RAM, superbacteria, nanomateriales, antibióticos, gestión de residuos, salud humana.

## Abstract

This article is concerned with the antimicrobial resistance (AMR) that some pathogens have developed. It highlighted how certain human behaviors are exacerbating this issue in aquatic and terrestrial environments. The AMR has become a global concern as bacteria adapt and evolve to resist the mechanisms of drugs designed to eliminate them, resulting in less effective treatments, and increasing the persistence and spreading of infectious diseases. The AMR not only compromises human health but also negatively affects aquatic ecosystems and biodiversity. Here, it is emphasized the role of technological advances, particularly the development of nanomaterials used to degrade antibiotics, as a promising measure to combat the environmental pollution caused by these substances and AMR. Additionally, this article proposes some strategies to minimize the impact of drug pollutants dissemination, including the responsible use of antibiotics in medicine and veterinary, improvements in waste management, and promotion of research and development of more sustainable alternatives for pathogen control. Finally, it is commented on the need for collective and responsible actions to preserve the effectiveness of current antibiotics, protect public health, and ensure the conservation of the ecosystems for future generations.

Keywords: AMR, superbacteria, nanomaterials, antibiotics, waste management, human health.

## Introducción

La resistencia a los antimicrobianos (RAM) representa una amenaza global para la salud pública, emergiendo como uno de los desafíos más significativos de la medicina contemporánea. En el 2019, la Organización Mundial de la Salud (OMS) incluyó a la RAM entre las diez principales amenazas a la salud mundial (Roberts & Zembower, 2021). Este fenómeno se manifiesta cuando las bacterias desarrollan resistencia a los antimicrobianos, o también llamados antibióticos, que anteriormente eran efectivos para su control, limitando las opciones de tratamiento en los pacientes afectados. Las superbacterias pueden propagarse de varias maneras, incluyendo el contacto humano, el agua y los alimentos contaminados (ver Figura 1). Éstas también pueden propagarse en los hospitales y otros entornos de atención médica, donde las bacterias pueden sobrevivir y propagarse con facilidad. Incluso, las superbacterias se pueden encontrar en lugares públicos, como gimnasios y escuelas.



Figura 1. Representación gráfica de una superbacteria. Generada utilizando DALL-E de OpenAI. URL: <https://www.openai.com/dall-e>.

Las superbacterias pueden causar infecciones graves y potencialmente mortales en cualquier parte del cuerpo, y se han convertido en un problema cada vez más común en la vida cotidiana. La OMS prevé que en el año 2050 se produzcan 10 millones de muertes relacionadas con esta clase de microorganismos (Giono-Cerezo et al., 2020). Para poder darse una idea

de la magnitud de la problemática que representa la RAM, el cáncer actualmente mata alrededor de 8 millones de personas al año. Por lo tanto, la RAM podría convertirse en la principal causa de muerte en el planeta en pocas décadas, esto sin considerar el posible impacto del consumo excesivo e incorrecto de antibióticos a causa de la pandemia por COVID-19.

La RAM surge de diversos factores, tales como el uso indebido y excesivo de antibióticos, la escasez de nuevas alternativas de tratamiento. Así como la propagación de bacterias resistentes entre seres humanos y animales, y la exposición continua de los microorganismos a contaminantes químicos como metales pesados, conservadores y desinfectantes (Huo et al., 2024), pues al igual que otros seres vivos, los microorganismos buscan sobrevivir frente a las amenazas externas, y cuentan con la capacidad de mutar con facilidad para reproducirse.

Los antibióticos revolucionaron el tratamiento de enfermedades infecciosas a principios del siglo XX. Junto con la introducción de vacunas y prácticas de higiene, los antibióticos redujeron la tasa de mortalidad de la población asociada a éstas. A pesar de que en la actualidad son ampliamente utilizados, el hallazgo y desarrollo de antibióticos se llevó a cabo a lo largo de un proceso largo y complejo que implicó a muchos científicos y descubrimientos significativos.

La historia de los antibióticos comenzó en 1928, cuando Alexander Fleming, un microbiólogo escocés, descubrió accidentalmente la penicilina. Fleming había estado investigando la bacteria *Staphylococcus aureus*, que causa una amplia gama de infecciones, cuando notó que una de sus placas de cultivo se había contaminado con un hongo. Sorprendentemente, notó que el hongo había inhibido el crecimiento de las bacterias en la placa de cultivo. Fleming identificó al hongo como *Penicillium notatum* y aisló el compuesto activo que lo hacía efectivo, la penicilina (Wong, 2003) (Figura 2).



Figura 2. Imagen ilustrativa de Alexander Fleming descubriendo la penicilina. Generada utilizando DALL-E de OpenAI. URL: <https://www.openai.com/dall-e>.

Sin embargo, el desarrollo de la penicilina como medicamento llevó varios años más. En la década de 1930, el equipo de investigación liderado por Howard Florey y Ernst Chain en la Universidad de Oxford realizó estudios clínicos con la penicilina en animales y humanos. Finalmente, en 1941 se logró producir suficiente penicilina para tratar a soldados heridos en la Segunda Guerra Mundial. El éxito de la penicilina inspiró la búsqueda de otros antibióticos. En la década de 1940 se descubrieron la estreptomina y la cloromicetina, que se utilizaron para tratar la tuberculosis y la fiebre tifoidea, respectivamente. En 1945 Fleming, Florey y Chain compartieron el premio nobel por sus grandes descubrimientos. Años más tarde se descubrieron la tetraciclina (Duggar, 1948) y la eritromicina, que ampliaron el alcance de los antibióticos.

Actualmente, algunos antibióticos que se utilizan ampliamente en los campos de la medicina y la medicina veterinaria han sido identificados como contaminantes emergentes. La razón por la que se consideran de esta manera es debido a que anteriormente no se realizaban seguimientos de eco farmacovigilancia, por ello, debido a su estabilidad a largo plazo frente a la radiación solar y a las condiciones ambientales, recientemente se han detectado altas concentraciones de estas sustancias en aguas residuales domésticas e industriales, favoreciendo su acumulación en ríos

(Hu et al., 2018), aguas subterráneas (Ma et al., 2015), mares (Nödler et al., 2014), lagos e incluso en agua potable (Zhou et al., 2024), provocando graves problemas de salud (Brillas, 2020). Este escenario se debe a que una parte de los antibióticos administrados no son metabolizados por el ser humano y los animales, por lo que son expulsados en las heces y la orina, diseminándose entonces a través de las aguas residuales (Li et al., 2021; Lyu et al., 2020). Además, con frecuencia hospitales e industrias no manejan adecuadamente este tipo de residuos por la falta de estandarización y la dificultad de monitorear a estos contaminantes, por lo que son desechados sin ningún tratamiento previo. Algunos de los antibióticos que se han encontrado en plantas de tratamiento de aguas residuales, residuos de hospitales, aguas pluviales y desechos industriales incluyen a la clindamicina, sulfametoxazol, amoxicilina, ciprofloxacina y tetraciclina.

La exposición de antibióticos en humanos no ha mostrado efectos adversos a largo plazo en bajas concentraciones. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que en grupos vulnerables (mujeres embarazadas y niños), la transmisión de la microbiota se ve alterada por el uso de antibióticos. Además, la exposición prolongada puede resultar en efectos adversos sobre el metabolismo e interferir con la susceptibilidad a enfermedades inmunomediadas (Cox & Blaser, 2015). El deliberado uso de antibióticos no sólo ha generado la RAM, sino también el incremento de desórdenes atópicos y crónicos inflamatorios (Fenneman et al., 2023).

A medida que la RAM continúa avanzando, es cada vez más difícil tratar las infecciones comunes y, en algunos casos, puede llevar a enfermedades graves e incluso la muerte. Por esta razón, es crucial que se tomen medidas inmediatas para combatir la RAM y garantizar que los antibióticos disponibles sigan siendo efectivos.

Una de las formas más importantes de combatir la RAM es reducir el uso innecesario de antibióticos. Esto incluye el uso de antibióticos para tratar infecciones virales, como los resfriados y la gripe, que no son causadas por bacterias y no responden al tratamiento con antibióticos. También es fundamental tomar los

antibióticos exactamente según las indicaciones del médico y completar todo el tratamiento, incluso si se siente mejoría antes de concluirlo, pues de lo contrario algunas bacterias pueden sobrevivir al tratamiento y desarrollar resistencia al fármaco. Además, de las recomendaciones anteriores es importante el desarrollo de nuevas opciones de tratamiento para las infecciones resistentes a los antibióticos actuales. Esto incluye la investigación y el desarrollo de nuevos fármacos y el uso de terapias alternativas, como la terapia fágica, que utiliza virus que infectan y eliminan específicamente bacterias.

## Nanomateriales

Los nanomateriales son materiales que tienen al menos una dimensión en la escala nanométrica ( $10^{-9}$  m). Para tener una idea de su tamaño, se requeriría unir alrededor de 10000 partículas de 10 nm para igualar el grosor de un cabello humano. Aunque los nanomateriales se han vuelto más prominentes en la ciencia y la tecnología en las últimas décadas, su historia se remonta mucho tiempo atrás. Uno de los primeros ejemplos de nanomateriales se encuentra en la naturaleza. Los minerales arcillosos, compuestos de nanocristales de silicatos, se han utilizado desde hace mucho tiempo como aditivos para mejorar la resistencia y la durabilidad de los materiales de construcción y las cerámicas.

En la década de 1950, el físico Richard Feynman propuso en su famoso discurso "Hay mucho espacio en el fondo" (There's Plenty of Room at the Bottom) el alcance que podría tener de la nanotecnología en diversas áreas del conocimiento. En las décadas siguientes, se realizaron avances importantes en la síntesis y caracterización de nanomateriales, incluyendo el descubrimiento de los nanotubos de carbono en 1991 por Sumio Iijima (Iijima, 1991). Desde entonces, los nanomateriales se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones. Por ejemplo, los nanotubos de carbono y las nanopartículas metálicas se han utilizado en la electrónica y la informática para mejorar la velocidad y la eficiencia de los dispositivos. En la industria alimentaria, los nanomateriales se han utilizado como aditivos para mejorar la textura y la apariencia de los alimentos.

Uno de los campos de aplicación más prometedores para los nanomateriales es la medicina. Los nanomateriales se pueden diseñar para dirigirse específicamente a células cancerosas y liberar medicamentos de manera controlada, lo que puede mejorar su eficacia y reducir los efectos secundarios de los tratamientos. Los nanomateriales también se están investigando como biosensores y dispositivos de diagnóstico para enfermedades.

## Nanomateriales Empleados en la Degradación de Antibióticos

La degradación de los antibióticos puede ser una estrategia útil para reducir la RAM, pero se necesita una tecnología adecuada para llevar a cabo la degradación de manera eficiente. En años recientes se han desarrollado nuevos materiales para la eliminación de antibióticos presentes en diferentes medios a fin de combatir la RAM. Uno de los materiales más prometedores para la degradación de los antibióticos es el grafeno y todos sus materiales derivados. El grafeno es un nanomaterial formado por capas extremadamente delgadas de carbono (un átomo de espesor), que tiene una alta superficie específica y una excelente conductividad eléctrica y térmica. El grafeno puede ser modificado químicamente para formar compuestos que pueden degradar los antibióticos de manera eficiente. Otro material que se ha utilizado para la degradación de antibióticos son las membranas de carbón recubiertas con nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), las cuales a través de procesos fotocatalíticos generan especies químicas capaces de degradar a las sustancias contaminantes. ¿Te has preguntado cómo es posible que la luz del sol pueda ayudar a limpiar el aire que respiramos? La respuesta está en este fenómeno fascinante llamado fotocatalisis, el cual es un proceso químico en el que una sustancia absorbe luz iniciando una serie de reacciones químicas de interés, como las que conducen a la transformación de antibióticos en productos menos dañinos para el medio ambiente.

Otra clase de fotocatalizadores que pueden ser obtenidos en escalas nanométricas son los basados en bismuto. El bismuto es un elemento químico no tóxico que presenta propiedades fotocatalíticas únicas, lo que lo convierte en una opción atractiva para la degradación de contaminantes orgánicos (Figura 3). Además, su bajo costo y su disponibilidad en la naturaleza lo hacen una alternativa económicamente viable. Por ejemplo, los compuestos  $\text{BiOIO}_3$ ,  $\text{BiFeWO}_6/\text{WO}_3$ ,  $m\text{-BiVO}_4$  @ fibras de carbono,  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2/\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  y  $\text{BiVO}_4$  han sido ampliamente estudiados como fotocatalizadores, principalmente porque pueden ser activados empleando la luz solar (Naushad et al., 2020). En la práctica, los nano-fotocatalizadores basados en bismuto se están probando en procesos de tratamiento de aguas residuales que contienen antibióticos con resultados preliminares alentadores. Además, se ha demostrado que los esta clase de nanomateriales pueden degradar eficientemente varios tipos de antibióticos, incluyendo la tetraciclina y la penicilina.



Figura 3. Nanomateriales degradando antibióticos. Generada utilizando DALL-E de OpenAI. URL: <https://www.openai.com/dall-e>.

## Conclusiones

Los antimicrobianos o antibióticos son sustancias valiosas e imprescindibles en la lucha contra las enfermedades infecciosas. Sin embargo, se ha identificado que diversos microorganismos han desarrollado resistencia a estos fármacos. La resistencia a los antibióticos (RAM) es un problema grave y creciente que requiere la atención y la cooperación de toda la comunidad médica y el público en general. En este sentido, el utilizar antibióticos de manera responsable y controlada, siguiendo las indicaciones del personal de salud, así como enfocarse en el desarrollo de nuevas opciones de tratamiento, contribuye en frenar el avance de la RAM y favorece que los antibióticos disponibles sigan siendo de utilidad. La prevención también es clave en la lucha contra la RAM. Esto incluye medidas como el lavado frecuente de manos, la limpieza adecuada de superficies y la implementación de prácticas adecuadas en el manejo y disposición de desechos en hospitales y clínicas. También es importante reducir el uso de antibióticos en animales destinados al consumo humano, ya que el uso excesivo de antibióticos en la ganadería puede propiciar la RAM.

En años recientes se han desarrollado nuevos materiales para la eliminación de antibióticos identificados como contaminantes persistentes en diferentes ecosistemas. En particular, la capacidad que tienen algunos nano-fotocatalizadores para degradar fármacos tiene un gran potencial en la lucha contra la RAM. Algunos de los nanomateriales más prometedores son los basados en grafeno, zeolitas y en metales no-tóxicos como el bismuto. El estudio y aprovechamiento de estos materiales puede tener un impacto significativo en la reducción de la RAM contribuyendo a la salud humana a nivel global.

## Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

## Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte económico brindado por la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP-BUAP). Rodrigo Vela Vázquez agradece al CONAHCYT la beca de posgrado otorgada (No. 761274).

## Referencias:

- Brillas, E. (2020). A review on the photoelectro-Fenton process as efficient electrochemical advanced oxidation for wastewater remediation. Treatment with UV light, sunlight, and coupling with conventional and other photo-assisted advanced technologies. *Chemosphere*, 250, 126198. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126198>
- Cox, L. M., & Blaser, M. J. (2015). Antibiotics in early life and obesity. *Nature Reviews Endocrinology*, 11(3), 182–190. <https://doi.org/10.1038/nrendo.2014.210>
- Duggar, B. M. (1948). Product of the continuing search for new antibiotics. *Ann NY Acad Sci*, 51, 177–181.
- Fenneman, A. C., Weidner, M., Chen, L. A., Nieuwdorp, M., & Blaser, M. J. (2023). Antibiotics in the pathogenesis of diabetes and inflammatory diseases of the gastrointestinal tract. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 20(2), 81–100. <https://doi.org/10.1038/s41575-022-00685-9>
- Giono-Cerezo, S., Santos-Preciado, J. I., Morfín-Otero, M. del R., Torres-López, F. J., & Alcántar-Curiel, M. D. (2020). Resistencia antimicrobiana. Importancia y esfuerzos por contenerla. *Gaceta Médica de México*, 156(2), 172-180. <https://doi.org/10.24875/gmm.20005624>
- Hu, Y., Yan, X., Shen, Y., Di, M., & Wang, J. (2018). Antibiotics in surface water and sediments from Hanjiang River, Central China: Occurrence, behavior and risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157(January), 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.083>
- Huo, M., Xu, X., Mi, K., Ma, W., Zhou, Q., Lin, X., Cheng, G., & Huang, L. (2024). Co-selection mechanism for bacterial resistance to major chemical pollutants in the environment. *Science of The Total Environment*, 912(August 2023), 169223. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169223>
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56–58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- Li, C., Li, Y., Li, X., Ma, X., Ru, S., Qiu, T., & Lu, A. (2021). Veterinary antibiotics and estrogen hormones in manures from concentrated animal feedlots and their potential ecological risks. *Environmental Research*, 198(August 2020), 110463. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110463>
- Lyu, J., Yang, L., Zhang, L., Ye, B., & Wang, L. (2020). Antibiotics in soil and water in China—a systematic review and source analysis. *Environmental Pollution*, 266, 115147. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115147>
- Ma, Y., Li, M., Wu, M., Li, Z., & Liu, X. (2015). Occurrences and regional distributions of 20 antibiotics in water bodies during groundwater recharge. *Science of the Total Environment*, 518–519, 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.100>
- Naushad, M., Rajendran, S., & Lichtfouse, E. (2020). Green Photocatalysts. In M. Naushad, S. Rajendran, & E. Lichtfouse (Eds.), *Springer Nature Switzerland* (Vol. 34, Issue September 2019). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15608-4>



- Nödler, K., Voutsas, D., & Licha, T. (2014). Polar organic micropollutants in the coastal environment of different marine systems. *Marine Pollution Bulletin*, 85(1), 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.024>
- Roberts, S. C., & Zembower, T. R. (2021). Global increases in antibiotic consumption: a concerning trend for WHO targets. *The Lancet Infectious Diseases*, 21(1), 10–11. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30456-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30456-4)
- Wong, J. (2003). Dr. Alexander Fleming and the discovery of penicillin. *Primary Care Update for OB/GYNs*, 10(3), 124–126. [https://doi.org/10.1016/s1068-607x\(03\)00006-4](https://doi.org/10.1016/s1068-607x(03)00006-4)
- Zhou, Z., Ma, W., & Zhong, D. (2024). The stress response mechanisms and resistance change of chlorine-resistant microbial community at multi-phase interface under residual antibiotics in drinking water distribution system. *Journal of Cleaner Production*, 438(August 2023), 140673. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140673>