

Bacterias que transforman contaminación en plata nanométrica: un enfoque biológico sostenible

Bacteria that transform pollution into nanometric silver: a sustainable biological approach

Huitrón-Lemus, J. E.^{1*} , Lopez-Rivero, A. S.² 

Historial del artículo

Recibido: 05-oct-2025

Aceptado: 20-nov-2025

Disponible en línea: 10-feb-2026

Palabras clave

ES: Nanopartículas de plata, Síntesis Verde, Biotecnología microbiana, Biorremediación, Sostenibilidad ambiental

EN: Silver nanoparticles, green synthesis, microbial biotechnology, bioremediation, environmental sustainability

RESUMEN

En este estudio se explora una alternativa inspirada en la naturaleza: el uso de bacterias como pequeñas fábricas vivas. En particular, se trabajó con *Pseudomonas aeruginosa*, una bacteria capaz de sobrevivir en ambientes contaminados y de realizar reacciones químicas naturales para obtener energía. En condiciones de laboratorio, esta bacteria fue expuesta a contaminantes orgánicos y a sales de plata. Al intentar adaptarse y sobrevivir, activó procesos naturales de intercambio de energía que le permitieron transformar la plata disuelta en nanopartículas. La formación de estas nanopartículas se observó inicialmente mediante cambios visibles de color y posteriormente fue confirmada con técnicas analíticas. Los resultados mostraron la obtención de nanopartículas de plata estables, de tamaño nanométrico, mediante un método reproducible, de bajo costo y respetuoso con el ambiente. Además, se identificaron genes bacterianos clave relacionados con el transporte de energía necesario para este proceso. Estos hallazgos sugieren que, en el futuro, las bacterias podrían convertirse en aliadas naturales para producir materiales avanzados y contribuir a la limpieza del ambiente de manera sostenible.

ABSTRACT

This study explores an alternative inspired by nature: the use of bacteria as tiny living factories. Specifically, it worked with *Pseudomonas aeruginosa*, a bacterium capable of surviving in contaminated environments and performing natural chemical reactions to obtain energy. Under laboratory conditions, this bacterium was exposed to organic pollutants and silver salts. In an attempt to adapt and survive, it activated natural energy exchange processes that allowed it to transform the dissolved silver into nanoparticles. The formation of these nanoparticles was initially observed through visible color changes and was later confirmed using analytical techniques. The results showed the production of stable, nanometer-sized silver nanoparticles using a reproducible, low-cost, and environmentally friendly method. In addition, key bacterial genes related to the energy transport necessary for this process were identified. These findings suggest that, in the future, bacteria could become natural allies in producing advanced materials and contributing to environmental cleanup in a sustainable manner.

Afiliaciones:

¹Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México. Correo: jesuseduardohuitronlemus@gmail.com

²Universidad Libre-Seccional Barranquilla, Atlántico, Colombia. Correo: arleths.lopezr@unilibre.edu.co

* Autor de correspondencia: jesuseduardohuitronlemus@gmail.com



Cuando la tecnología contamina: el reto de producir materiales que cuiden la vida y el planeta

Tomamos un objeto cotidiano, como una moneda de plata, y empezar a dividirla una y otra vez. Primero en pedazos pequeños, luego en polvo, y después en fragmentos tan diminutos que ya no se comportan como la plata que se conoce. En ese punto extremo aparecen las nanopartículas: partículas tan pequeñas que su tamaño se mide en nanómetros, es decir, millones de veces más pequeñas que un grano de arena y miles de veces más delgadas que un cabello humano.

A esa escala, los materiales cambian sus reglas. La plata, por ejemplo, se vuelve especialmente activa: puede impedir el crecimiento de bacterias, interactuar mejor con su entorno y reaccionar de formas imposibles de observar en objetos grandes. Por eso las nanopartículas de plata se han vuelto tan valiosas en medicina, purificación de agua y materiales avanzados. El desafío no es solo usarlas, sino fabricarlas sin dañar el ambiente.

Aquí entra en escena una aliada poco común: una bacteria acostumbrada a vivir donde otros no sobreviven. En lugar de verla solo como un microorganismo, podemos imaginarla como una ingeniera microscópica, experta en manejar energía y transformar sustancias difíciles. Cuando se encuentra con contaminantes y con plata disuelta, activa sus propios mecanismos internos para sobrevivir. En ese proceso, mueve electrones, rompe compuestos dañinos y, casi sin proponérselo, convierte la plata en nanopartículas.

La bacteria no “sabe” que está haciendo nanotecnología, pero su metabolismo actúa como un taller natural, silencioso y eficiente. Así, un organismo diminuto demuestra que la naturaleza no solo inspira soluciones: ya las está ejecutando, esperando que aprendamos a observarlas y aprovecharlas de forma responsable.

En un mundo cada vez más dependiente de la tecnología, resulta curioso, y hasta contradictorio, que muchos de los materiales creados para mejorar la salud y proteger el ambiente se fabriquen mediante procesos que dañan al propio planeta. Tal es el caso de las nanopartículas de plata, pequeños fragmentos de plata tan diminutos que son invisibles al ojo humano, pero muy poderosos por su capacidad para eliminar bacterias [1].

Como se muestra en la Figura 1, existen dos formas muy distintas de producir estas nanopartículas. El método tradicional (a) utiliza sustancias químicas peligrosas, altas temperaturas y genera residuos tóxicos. En contraste, el enfoque propuesto (b) apuesta por algo mucho más sencillo y natural: usar microorganismos vivos que ya saben trabajar en ambientes contaminados.

Las nanopartículas de plata se emplean hoy en día en hospitales, textiles, envases de alimentos y sistemas de tratamiento de agua. Sin embargo, su producción convencional contribuye a la contaminación ambiental. Al mismo tiempo, el planeta enfrenta un grave problema por la acumulación de hidrocarburos y desechos industriales. Esta situación nos obliga a replantear nuestras estrategias y buscar soluciones que ataquen ambos problemas a la vez.

De esta reflexión surge una pregunta clave: ¿podemos aprovechar las habilidades naturales de ciertos microorganismos para limpiar ambientes contaminados y, al mismo tiempo, fabricar materiales útiles? Este artículo explora esa posibilidad, mostrando cómo una bacteria

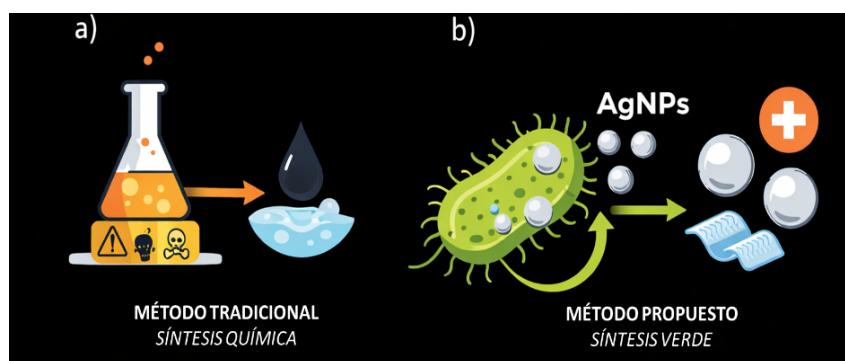


Figura 1: Representación esquemática del cambio de paradigma en la producción de nanopartículas de plata: desde métodos químicos contaminantes (a) hacia un enfoque biológico sostenible (b).

con capacidades metabólicas especiales puede convertirse en una aliada inesperada de la nanotecnología verde. A través de procesos naturales de degradación y transferencia de energía, la biología demuestra que es posible avanzar hacia tecnologías más limpias, económicas y sostenibles, inspiradas directamente en la naturaleza [2].

De la nanotecnología química a la biológica: dos caminos que finalmente se encuentran

Durante muchos años, la fabricación de nanopartículas metálicas siguió un camino bien definido: laboratorios, altas temperaturas, mucha energía y sustancias químicas agresivas. Estos métodos químicos y físicos permitieron grandes avances en la nanotecnología, como controlar el tamaño y la forma de las partículas, pero también dejaron una huella ambiental considerable [3].

Mientras tanto, en un terreno distinto, la biotecnología microbiana avanzaba por su cuenta. Su atención estaba puesta en otros objetivos: la fermentación de alimentos, la producción de antibióticos y la eliminación de contaminantes del ambiente. Durante décadas, ambos campos crecieron en paralelo, casi sin dialogar entre sí. Uno se enfocaba en producir, el otro en limpiar.

Esta separación tenía consecuencias claras. Los métodos químicos ofrecían precisión, pero generaban residuos peligrosos y consumían grandes cantidades de energía. Por otro lado, las estrategias microbianas de biorremediación buscaban únicamente eliminar contaminantes, sin pensar en la posibilidad de obtener algo útil a cambio [4]. Así, la idea de limpiar el ambiente y producir materiales valiosos al mismo tiempo parecía, simplemente, fuera de alcance.

El punto de quiebre llegó cuando diversos estudios demostraron algo inesperado: algunos microorganismos no solo sobreviven en ambientes contaminados, sino que usan los contaminantes como parte de su metabolismo. En particular, ciertas bacterias son capaces de transferir electrones y transformar iones metálicos, un proceso esencial para su supervivencia. Investigaciones pioneras revelaron que bacterias como *Pseudomonas aeruginosa* producen moléculas y enzimas capaces de reducir metales disueltos y convertirlos en nanopartículas estables [5], [6].

Este descubrimiento cambió la forma de entender la contaminación: dejó de ser solo un

problema y comenzó a verse como un recurso metabólico. A partir de ahí, numerosos estudios confirmaron que la llamada síntesis verde de nanopartículas puede ser reproducible, eficiente y respetuosa con el ambiente. Así nació un nuevo paradigma, donde nanotecnología y biotecnología microbiana convergen para demostrar que producir y proteger no tienen por qué ser objetivos opuestos.

Microorganismos como microfábricas: convertir contaminación en nanopartículas útiles

El sistema integra tres elementos clave: 1. La bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, 2. Un medio contaminado con hidrocarburos que estimula su metabolismo, y 3. Sales de plata que funcionan como precursor metálico.

La contaminación como aliada metabólica: activar bacterias para algo más que sobrevivir

Para comenzar el estudio, la bacteria fue puesta en un escenario desafiante, diseñado para imitar un ambiente contaminado. Se cultivó en un medio nutritivo especial al que se le añadió aceite quemado, una mezcla compleja de hidrocarburos difícil de degradar. Esta condición obligaba a la bacteria a activar sus mecanismos internos de adaptación [7].

Los resultados fueron evidentes. En los sistemas de control sin bacterias, el medio permaneció sin cambios visibles. En contraste, las placas inoculadas mostraron zonas de coloración marrón, una señal clara de que la bacteria estaba transformando activamente el aceite quemado (Figura 2).

Este experimento confirmó que la bacteria responde de forma activa y organizada, generando compuestos con capacidad redox para mover energía y electrones [8].

Síntesis verde en acción: cuando el metabolismo bacteriano fabrica plata a escala nanométrica

En la segunda etapa, al sobrenadante se le añadió nitrato de plata. Los metabolitos bacterianos actuaron como agentes reductores naturales, convirtiendo la plata disuelta en nanopartículas metálicas de forma suave y sostenible [9]. La formación de las nanopartículas fue confirmada mediante espectroscopía UV-Visible, mostrando un pico de absorbancia característico alrededor de los 430 nm (Figura 3).

La caracterización fisicoquímica mediante FTIR y SEM (Figura 4) reveló la presencia de compuestos orgánicos bacterianos asociados a la superficie de las nanopartículas, los cuales actúan estabilizando el sistema. Las imágenes SEM confirmaron una morfología mayoritariamente esférica con tamaños en el rango nanométrico [7].

La actividad antimicrobiana fue evaluada mediante el método de Kirby–Bauer frente a

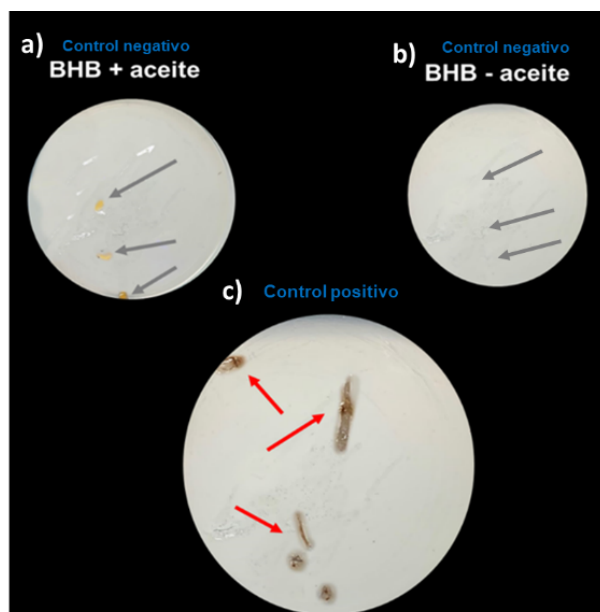


Figura 2: Evaluación preliminar de la capacidad de *Pseudomonas aeruginosa* para la degradación de hidrocarburos.

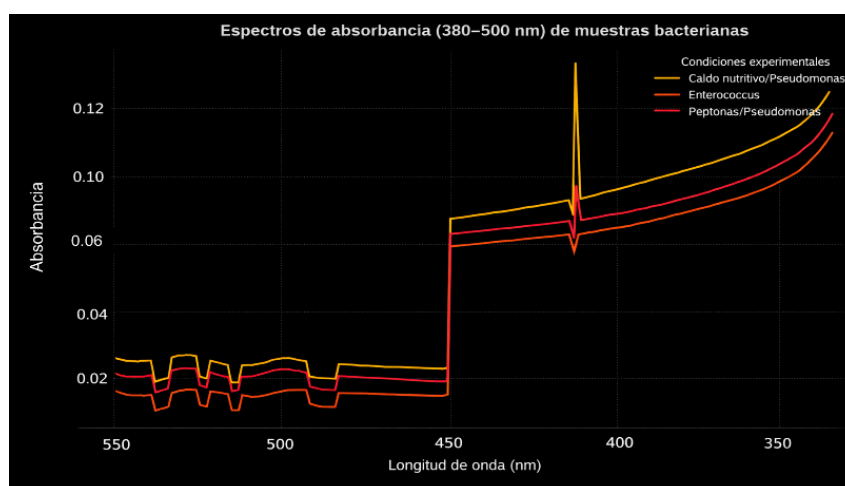


Figura 3: Espectros de absorbancia que evidencian la formación de nanopartículas de plata (pico cercano a 430 nm).

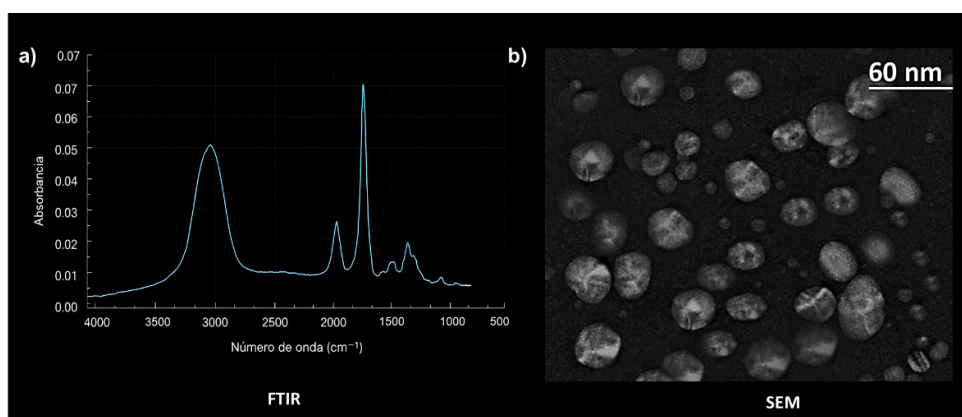


Figura 4: Caracterización de nanopartículas: (a) Espectro FTIR y (b) Imagen SEM.

Enterococcus (Figura 5). Los resultados mostraron halos de inhibición definidos de aprox. 1.3 cm, confirmando el potencial funcional de las nanopartículas obtenidas [8].

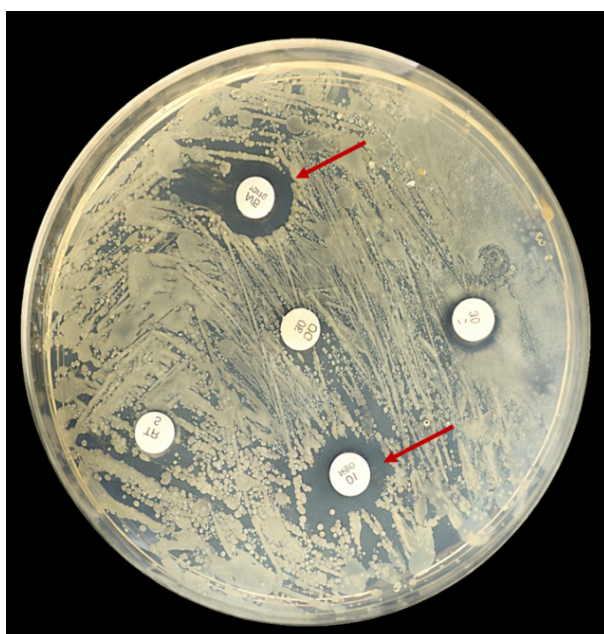


Figura 5: Ensayo de sensibilidad antimicrobiana frente a *Enterococcus*.

Cuando los genes cuentan la historia: electrones, enzimas y nanopartículas

El análisis bioinformático identificó genes clave implicados en la transferencia electrónica: *nuoF*, *nirS*, y *petF* (Figura 6). Estos genes codifican proteínas que organizan el flujo de electrones necesario para reducir la plata de forma eficiente [10], [11], [12].

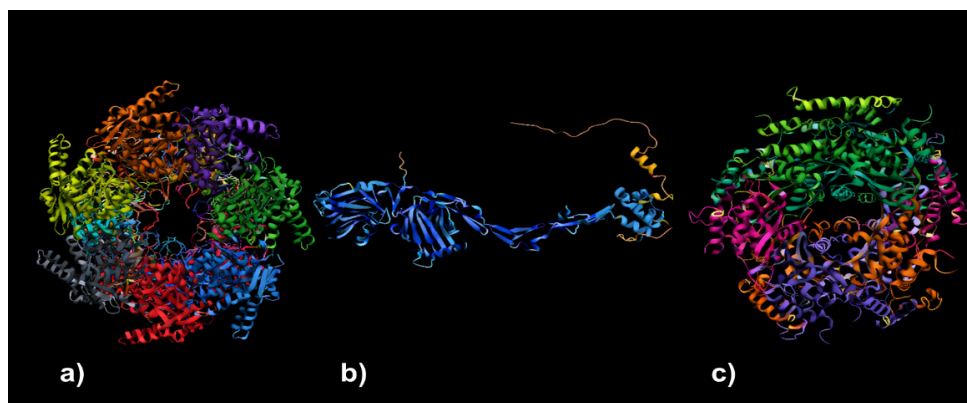


Figura 6: Modelado estructural 3D de proteínas asociadas a la biosíntesis de nanopartículas.

De residuo a recurso: la bionanotecnología como puente entre ambiente y tecnología

Este trabajo demuestra que la bionanotecnología puede convertir residuos en recursos, integrando la remediación ambiental con la fabricación de materiales de alto valor. La bacteria *Pseudomonas aeruginosa* actúa como una microfábrica viva capaz de enfrentar retos ambientales y tecnológicos simultáneamente.

Impacto actual y horizontes futuros de la nanotecnología sostenible

Las nanopartículas de plata ya forman parte de la vida cotidiana, integrándose en productos estratégicos donde la higiene y la seguridad son prioritarias, como apósitos médicos para prevenir infecciones, recubrimientos antimicrobianos en textiles hospitalarios, envases de alimentos y sistemas de tratamiento de agua [13]. En este contexto, el enfoque biológico presentado demuestra que es posible transformar un problema ambiental en una oportunidad tecnológica tangible. Por ejemplo, en escenarios de aguas residuales contaminadas con hidrocarburos, el sistema propuesto cumpliría una doble función: reducir la carga contaminante mediante biorremediación y, simultáneamente, producir nanopartículas con valor comercial. Esta estrategia no solo reduce el uso de reactivos tóxicos y el consumo energético, sino que aumenta la viabilidad económica del proceso al utilizar insumos de bajo costo.

El impacto de estos avances trasciende el laboratorio y se traduce directamente en beneficios sociales, como productos médicos más confiables, entornos más limpios y nuevas oportunidades profesionales. La creciente demanda de soluciones sostenibles impulsará la necesidad de perfiles interdisciplinarios capaces de integrar biotecnología, nanotecnología, ingeniería ambiental y bioinformática, fomentando carreras orientadas a la innovación responsable. Sin embargo, el uso de microorganismos con fines tecnológicos también plantea retos éticos y de bioseguridad, haciendo fundamental el establecimiento de marcos regulatorios claros que aseguren que los beneficios ambientales y sociales superen cualquier riesgo potencial en el desarrollo responsable de estas tecnologías [14].

De cara al futuro, la nanotecnología sostenible se encamina hacia la estandarización de procesos biológicos y el uso de inteligencia artificial para optimizar rutas metabólicas, lo que permitirá diseñar microorganismos más eficientes. A largo plazo, esta convergencia tecnológica podría transformar la manufactura de materiales avanzados, consolidando a las bacterias como “microfábricas vivas” dentro de una economía circular. Este nuevo paradigma industrial, descentralizado y sostenible, promete revolucionar la forma en que producimos y protegemos nuestro entorno [15].

Referencias

- [1] C. Gunawan et al., “Widespread and Indiscriminate Nanosilver Use: Genuine Potential for Microbial Resistance”, *ACS Nano*, vol. 11, n.º 4, págs. 3438-3445, 2017. DOI: [10.1021/acsnano.7b01166](https://doi.org/10.1021/acsnano.7b01166)
- [2] N. Das y P. Chandran, “Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview”, *Biotechnology Research International*, vol. 2011, pág. 941 810, 2011. DOI: [10.4061/2011/941810](https://doi.org/10.4061/2011/941810)
- [3] X. Xu et al., “Petroleum Hydrocarbon-Degrading Bacteria for the Remediation of Oil Pollution Under Aerobic Conditions: A Perspective Analysis”, *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, 2018. DOI: [10.3389/fmicb.2018.02885](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885)
- [4] N. Durán, P. D. Marcato, M. Durán, A. Yadav, A. Gade y M. Rai, “Mechanistic aspects in the biogenic synthesis of extracellular metal nanoparticles by peptides, bacteria, fungi, and plants”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 90, págs. 1609-1624, 2011. DOI: [10.1007/s00253-011-3249-8](https://doi.org/10.1007/s00253-011-3249-8)
- [5] R. Singh, B. Shedbalkar, S. Wadhvani y B. Chopade, “Bacteriogenic silver nanoparticles: synthesis, mechanism, and applications”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 99, n.º 11, págs. 4579-4593, 2015. DOI: [10.1007/s00253-015-6622-1](https://doi.org/10.1007/s00253-015-6622-1)
- [6] S. S. Shankar, A. Rai, A. Ahmad y M. Sastry, “Rapid synthesis of Au, Ag, and bimetallic Au core–Ag shell nanoparticles using Neem (*Azadirachta indica*) leaf broth”, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 275, n.º 2, págs. 496-502, 2004. DOI: [10.1016/j.jcis.2004.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.03.003)
- [7] C. G. Kumar y S. K. Mamidyala, “Extracellular synthesis of silver nanoparticles using culture supernatant of *Pseudomonas aeruginosa*”, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 84, n.º 2, págs. 462-466, 2011. DOI: [10.1016/j.colsurfb.2011.01.042](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.01.042)
- [8] I. Sondi y B. Salopek-Sondi, “Silver nanoparticles as antimicrobial agent: a case study on *E. coli* as a model for Gram-negative bacteria”, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 275, n.º 1, págs. 177-182, 2004. DOI: [10.1016/j.jcis.2004.02.012](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.012)
- [9] K. Rabaey, N. Boon, M. Höfte y W. Verstraete, “Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells”, *Environmental Science & Technology*, vol. 39, n.º 9, págs. 3401-3408, 2005. DOI: [10.1021/es048563o](https://doi.org/10.1021/es048563o)

-
- [10] S. H. Saunders et al., “Extracellular DNA promotes efficient extracellular electron transfer by pyocyanin in *Pseudomonas aeruginosa* biofilms”, *Cell*, vol. 182, págs. 919-932, 2020. DOI: [10.1016/j.cell.2020.07.006](https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.07.006)
- [11] F. Cutruzzolà et al., “The nitrite reductase from *Pseudomonas aeruginosa*: Essential role of two active-site histidines in the catalytic and structural properties”, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 98, n.º 5, págs. 2232-2237, 2001. DOI: [10.1073/pnas.041365298](https://doi.org/10.1073/pnas.041365298)
- [12] T. N. Hreha et al., “The three NADH dehydrogenases of *Pseudomonas aeruginosa*: Their roles in energy metabolism and links to virulence”, *PLOS ONE*, vol. 16, n.º 2, e0244142, 2021. DOI: [10.1371/journal.pone.0244142](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244142)
- [13] S. M. Bergin y P. Wraight, “Silver based wound dressings and topical agents for treating diabetic foot ulcers”, *Cochrane Database of Systematic Reviews*, n.º 1, pág. CD005082, 2006. DOI: [10.1002/14651858.CD005082.pub2](https://doi.org/10.1002/14651858.CD005082.pub2)
- [14] A. W. Bauer, W. M. M. Kirby, J. C. Sherris y M. Turck, “Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method”, *American Journal of Clinical Pathology*, vol. 45, n.º 4, págs. 493-496, 1966. DOI: [10.1093/ajcp/45.4_ts.493](https://doi.org/10.1093/ajcp/45.4_ts.493)
- [15] Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI), *Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests*, *CLSI Standard M02*. Wayne, PA, USA: CLSI, 2023.