

Producción de ramnolípidos y otros metabolitos secundarios por *Pseudomonas aeruginosa* en México: del matraz a la industria y su potencial en biorremediación

Production of rhamnolipids and other secondary metabolites by *Pseudomonas aeruginosa* in Mexico: from the flask to the industry and its potential in bioremediation

Gloria Soberón-Chávez¹, Carolina Calderón-Chiu², Uriel Gutiérrez-Gómez^{3*}

¹Instituto de Investigaciones Biomédicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

²Academia de Ingeniería en Industrias Alimentarias del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, Teziutlán, 73960, Puebla, Mexico.

³Instituto de Farmacobiología de la Universidad de la Cañada, Oaxaca, México.

*Autor de correspondencia: uriel@unca.edu.mx

Palabras clave:

biosurfactante, glicolípido, metabolitos secundarios bacterianos, polihidroxicanoatos, pirocianina, aislados bacterianos ambientales.

Keywords:

biosurfactant, glycolipid, bacterial secondary metabolites, polyhydroxyalkanoates, pyocyanin, environmental bacterial isolates.

Resumen

Los ramnolípidos (RLs) son glicolípidos producidos principalmente por cepas de *Pseudomonas aeruginosa*, que han sido ampliamente utilizados en la biorremediación de hidrocarburos y en la formulación de productos de cuidado personal. Los RLs presentan baja toxicidad y alta biodegradabilidad en comparación con los surfactantes sintéticos; por tanto, se consideran la próxima generación de biosurfactantes. Sus aplicaciones se extienden a las industrias farmacéuticas, cosméticas y alimentarias gracias a sus propiedades antifúngicas, antimicrobianas e inmunoestimulantes. *P. aeruginosa* también produce polihidroxicanoatos y pigmentos como la pirocianina, valiosos en la producción de envases y textiles. Sin embargo, la producción de RLs en México ha sido poco explorada, principalmente debido a la falta de información sobre sus aplicaciones y el costo de su producción. Este artículo busca destacar los avances tecnológicos en México relacionados con la producción de RLs y de otros compuestos por *P. aeruginosa*, y así promover su escalamiento industrial en el país.

Abstract

Rhamnolipids (RLs) are glycolipids produced mainly by strains of *Pseudomonas aeruginosa*. They are increasingly utilized in hydrocarbon bioremediation and the formulation of personal care products. RLs are known for their low toxicity and high biodegradability compared to synthetic surfactants, making them a promising next-generation biosurfactant. Their applications extend to the pharmaceutical, cosmetic, and food industries due to their antifungal, antimicrobial, and immunostimulant properties. In addition to producing RLs, *P. aeruginosa* also generates polyhydroxyalkanoates and pigments, such as pyocyanin, which are valuable for creating packaging and textiles. However, the production of RLs in Mexico has been minimally explored, primarily due to a lack of information on their applications and the cost of their production. This article aims to highlight technological advances in Mexico concerning the production of RLs and other compounds by *P. aeruginosa*, with the goal of promoting their industrial scaling in the country.

Recibido: 12 de agosto 2025
Revisado: 08 de diciembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

Los ramnolípidos (RLs) son biosurfactantes producidos principalmente por cepas bacterianas de *Pseudomonas aeruginosa*, los cuales exhiben excelentes características físico-químicas, haciéndolos potencialmente aptos en diversas aplicaciones industriales, tales como la biomédica, farmacéutica, cosmética, alimentaria y por asistir en procesos de biorremediación. Debido a su baja toxicidad y alta capacidad de biodegradación, en comparación con los surfactantes sintéticos, se consideran la próxima generación de biosurfactantes (Soberón-Chávez et al., 2021). Debido a las múltiples y potenciales aplicaciones de estas moléculas, la demanda mundial de RLs se ha incrementado considerablemente. De hecho, la empresa de investigación de mercado y consultoría de gestión *Global Market Insights Inc* ha predicho que el mercado de RLs alcanzará cifras de más de 145 millones de dólares en 2026 (Dittmann et al., 2023).

Sin embargo, las aplicaciones industriales y la comercialización de RLs aún se ven limitadas por la baja producción y por la patogenicidad de *P. aeruginosa*. Por esta razón, alrededor del mundo se han abordado investigaciones enfocadas en encontrar estrategias para mejorar la producción de RLs de forma segura. Estas incluyen la manipulación genética y la obtención de cepas de medios ambientales con capacidad para sobreproducir RLs. En México, el uso de biosurfactantes de tipo RLs para asistir en procesos de biorremediación no ha sido implementado debido a la falta de investigación relacionada con su producción. Por tanto, el objetivo de este artículo es describir las investigaciones científicas realizadas en México acerca de la producción de RLs y otros metabolitos secundarios por bacterias de *P. aeruginosa* con el fin de aumentar el interés en estas moléculas de gran potencial industrial.

Biosurfactantes glicolípidicos (ramnolípidos) y sus aplicaciones

Los RLs fueron descubiertos por primera vez en la bacteria *P. aeruginosa*, aunque también han sido producidos por otros microorganismos de los géneros *Burkholderia*, *Klebsiella*, *Meyerozyma*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus* y *Achromobacter* y en hongos como *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Agrocybe* y *Candida*. No obstante, *P. aeruginosa* es reconocida como la principal productora de RLs en el mercado mundial, lo que resalta la importancia de este microorganismo a nivel industrial (Soberón-Chávez et al., 2021).

Estructuralmente, los RLs son moléculas formadas por una fracción hidrofílica compuesta por una o dos moléculas de ramnosa (mono- o di-RLs, respectivamente) y por una fracción hidrofóbica compuesta por dos ácidos grasos de longitud variable (Figura 1). Los mono- o di-RLs tienen características surfactantes, pero la presencia de una o dos moléculas de ramnosa les otorga diferentes propiedades físico-químicas (Eslami et al., 2020). Dentro de estas propiedades se incluyen la detergencia,

emulsionante, secuestrador de metales, desemulsificante, humectante, espesante, espumante, entre otros. Todas estas propiedades son asociadas al carácter anfílico de los RLs, que les confieren la capacidad de reducir las tensiones superficiales e interfaciales en fluidos (Sinumvayo, 2015).

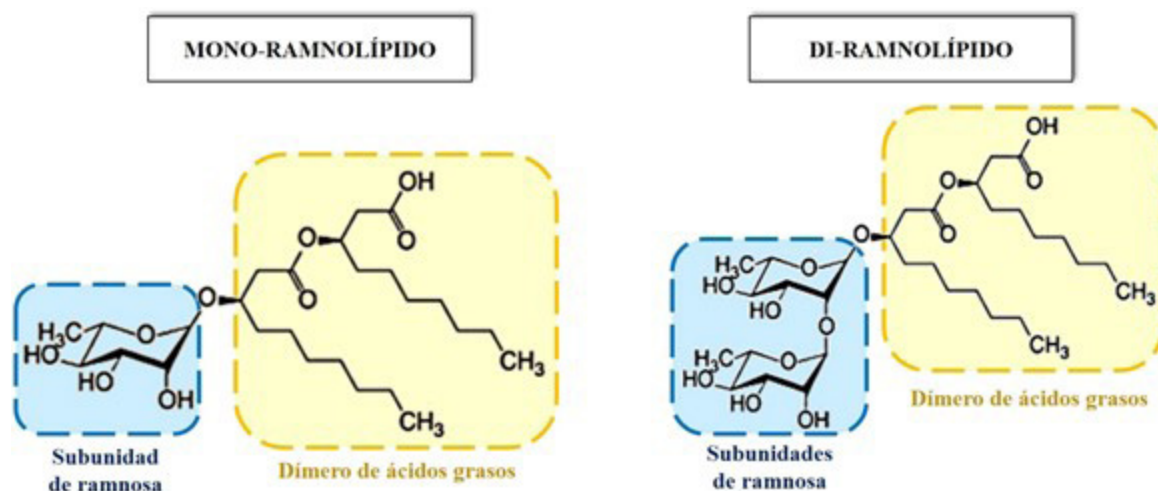


Figura 1. Tipos de ramnolípidos
Fuente: Propia

Por esta razón, los RLs han tenido amplia aplicación en sectores industriales, como el procesamiento de alimentos, la agricultura, la industria farmacéutica y cosmética, así como en aplicaciones médicas (Sinumvayo, 2015; Tiso et al., 2017; Varjani et al., 2021). En la industria alimentaria, los RLs tienen aplicación como conservadores debido a sus propiedades antimicrobianas y agentes emulsionantes, incluso como componentes de nanopartículas cargadas de compuestos bioactivos. De igual forma, los RLs podrían formar parte de estrategias alternativas para reducir o reemplazar los pesticidas convencionales usados en la agricultura, pues tienen el potencial de inhibir plagas (hongos e insectos) en cultivos de importancia agrícola (Sinumvayo, 2015). Sin embargo, la principal aplicación de los RLs ha sido asistir en la degradación de hidrocarburos en procesos de biorremediación.

Uso de RLs en biorremediación de hidrocarburos en México

La contaminación por hidrocarburos es motivo de preocupación social por los efectos nocivos en la salud humana y al medio ambiente (Christova et al., 2019). La remediación, es decir, el proceso para tratar medios contaminados con hidrocarburos, se basa en el uso de agentes químicos, en particular, surfactantes sintéticos. Dichos surfactantes están constituidos por una parte afín al agua (hidrofílica o cabeza) y otra fracción repelente al agua (hidrofóbica o cola) (Zhao et al., 2024). Estos



agentes surfactantes aumentan la solubilidad y la movilidad de los hidrocarburos en agua, lo que facilita su eliminación; por esta razón, su uso ha constituido el método de remediación más eficaz en los últimos años (Zhao et al., 2024). No obstante, el alto costo y los riesgos ambientales ocasionados por surfactantes sintéticos exigen la reevaluación de su uso (Tabla 1), principalmente por los efectos perjudiciales en el ecosistema y la generación de contaminantes secundarios con alta toxicidad (Samuel-Osamoka et al., 2023).

Una de las alternativas para la remoción de los hidrocarburos es la remediación microbiana (biorremediación). La biorremediación utiliza microorganismos (bacterias, algas, hongos) para descomponer, cambiar, eliminar, inmovilizar o desintoxicar diversos contaminantes físicos y químicos del medio ambiente. El uso de microorganismos nativos de ambientes naturales es una gran ventaja, ya que éstos tienen un metabolismo inherentemente adaptado a la interacción con otros organismos o elementos abióticos de un ambiente. La elección del microorganismo para asistir en procesos de biorremediación depende de su capacidad de remoción de contaminantes, sin provocar un efecto negativo sobre el entorno en el que es aplicado.

La implementación de procesos de biorremediación ofrece ventajas adicionales, en las que destacan su rentabilidad, simplicidad y la generación de menos contaminantes secundarios que los surfactantes sintéticos. La producción exacta de contaminantes secundarios producidos por procesos de biorremediación o con los surfactantes sintéticos no es tan fácil de predecir de forma precisa y cuantitativa, lo cual se debe a la complejidad de los ambientes en tratamiento. Sin embargo, las especies químicas secundarias generadas en procesos de biorremediación corresponden a subproductos de vías metabólicas que son capaces de continuar con su catabolismo hacia CO_2 , biomasa o energía. Por el contrario, el metabolismo de surfactantes sintéticos, en muchos casos generan residuos poco aptos para el catabolismo a corto o mediano plazo (Bala et al., 2022).

Tabla 1. Efectos de surfactantes sintéticos sobre ambientes acuáticos y suelo

Ambiente	Efectos abióticos	Efectos bióticos
Acuático	Incremento en la concentración de contaminantes solubles e insolubles en agua	Inhibición de crecimiento de microalgas marinas, plancton y plantas acuáticas
	Eutrofización y adición de fosfatos	Alteraciones en visión de peces y daños en branquias
Acuático	Consumo y agotamiento acelerado de oxígeno disuelto	Disminución de adsorción de oxígeno por organismos acuáticos
		Disminución de velocidad de reproducción e inducción de anomalías congénitas en peces
Suelo	Disminución de retención e infiltración de agua	Reducción de componentes bióticos en ecosistemas del suelo
	Generación de suelos secos	Ralentización en degradación de xenobióticos
	Función de raíz deficiente	
	Crecimiento retardado de plantas	
Suelo	Incremento de salinidad del suelo	

Fuente: Arora et al. (2022)

Lo anterior, destaca el efecto benéfico de implementar procesos de biorremediación en lugar de los métodos convencionales (Tabla 2), ya que además de producir RLs que pueden asistir en la degradación de hidrocarburos aromáticos alifáticos y policíclicos del ambiente, también se estimula el crecimiento de bacterias autóctonas (Oluwaseun et al., 2017; Phulpoto et al., 2022). Los RLs, al igual que los surfactantes sintéticos, reducen la tensión superficial y emulsionan las fracciones hidrofóbicas de los hidrocarburos, lo que conduce a la formación de micelas (Figura 2). Las micelas se forman cuando las partes hidrofílicas del biosurfactante se orientan hacia la parte acuosa del medio, en tanto su parte hidrofóbica o cola se une a los hidrocarburos contaminantes; de tal forma que los biosurfactantes rodean completamente al contaminante hidrofóbico (Chicca et al., 2022; Rezaei & Moghimi, 2024). Esto facilita la adsorción del contaminante en la célula microbiana para su posterior degradación enzimática intra- y extracelular (Sánchez, 2022).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de biorremediación y la remediación tradicional

	Remediación tradicional	Biorremediación
Ventajas	Recomendable para compuestos altamente tóxicos o recalcitrantes Resultados en poco tiempo Gran utilidad en contención inmediata de contaminación Efectividad contra un amplio espectro de contaminantes, incluyendo sustancias no biológicas (metales pesados y material radiactivo).	Menor costo Disrupción mínima de ecosistemas Potencial mínimo de contaminación secundaria Uso de microorganismos capaces de adaptarse a diferentes contaminantes Beneficios ecológicos a largo plazo
Desventajas	Perturbación significativa del ambiente y mayor costo No promueven la restauración ecológica y pueden provocar problemas ambientales a largo plazo.	Proceso relativamente lento Uso para casos leves o menos críticos de contaminación Dependiente de combinación multifactorial de condiciones óptimas para implementación

Fuente: Reynolds (2023)

La efectividad de los RLs en procesos de biorremediación está determinada por parámetros físico-químicos tales como la tensión superficial (26–29 mN/m), índice de emulsificación (E24: 50–85 %), concentración micelar crítica (CMC: 50–200 mg/L), y la capacidad de remoción de hidrocarburos superiores a 50% (Garg et al., 2025; Safari et al., 2023; Zhuang et al., 2022). Por ejemplo, en el caso particular de la remoción de *n*-alcanos (C_{10} - C_{30}), los RLs registran una capacidad de remoción de hidrocarburos del 61%, mientras que los surfactantes químicos presentan un máximo de 18.75% en las mismas condiciones (Zhuang et al., 2022), lo cual destaca la eficacia de los biosurfactantes.

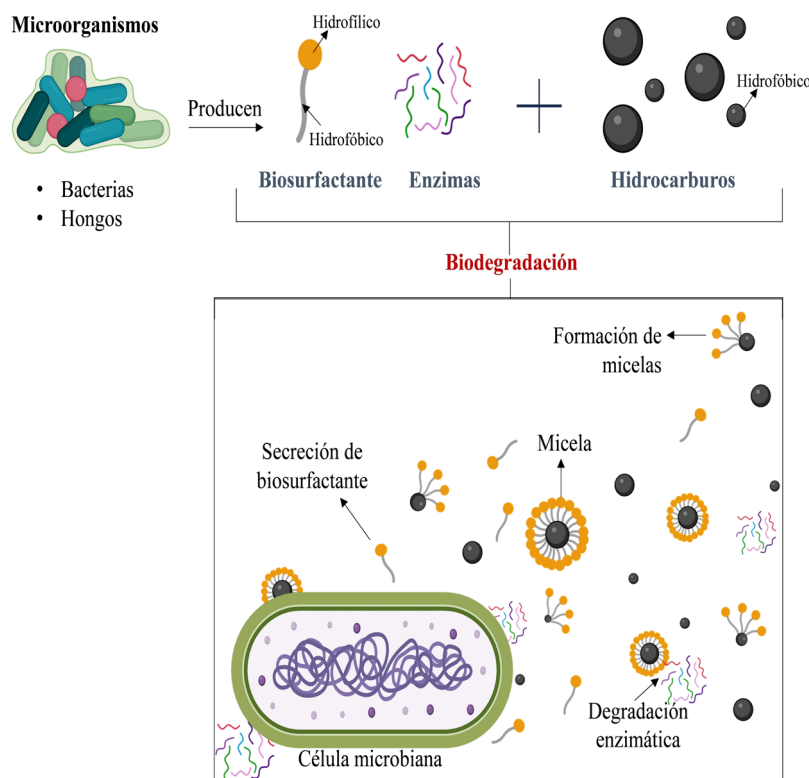


Figura 2. Biodegradación de hidrocarburos asistida por biosurfactantes
Fuente: Adaptada de Sánchez (2022)

En México, Mata-Guadarrama (2022) aisló una cepa de *Pseudomonas sp.* de suelo contaminado por hidrocarburos de fracción pesada con la finalidad de producir RLs para emplearlos en la remoción de hidrocarburos del suelo. De acuerdo con sus hallazgos, esta cepa produjo RLs con la capacidad de formar emulsiones con un índice de emulsificación del 66% en aceites pesados. El estudio evidenció que los RLs mejoraron la eficiencia de remoción de hidrocarburos de fracción pesada del suelo y favorecieron el crecimiento de la población microbiana comparado con la aplicación de surfactantes químicos. Hasta donde se sabe, el uso de RLs para procesos de biorremediación a nivel industrial ha sido poco explorado en México. Sin embargo, la evidencia resalta que el uso de cepas ambientales para producir RLs y asistir en la remoción de contaminantes derivados del petróleo es una alternativa viable a los métodos convencionales de remediación que valdría la pena explorar.

Producción de RLs en México a partir de cepas de *P. aeruginosa* ambientales

En general, la aplicación de los RLs se ha limitado por los altos costos del proceso de fermentación. Factores como el costo de la fuente de carbono y otros nutrientes, así como el método de producción, han restringido su obtención. Para superar estos incon-

venientes, se han realizado estrategias para una producción de RLs más rentable. Estas incluyen el uso de sistemas heterólogos no patógenos como *Pseudomonas putida* KT2440 y el desarrollo de cepas genéticamente modificadas con capacidad de sobreproducir RLs.

En México, un grupo de investigadores, liderados por la Dra. Gloria Soberón Chávez del Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, realizó una investigación para la producción de RLs en cepas no virulentas de *Pseudomonas* modificadas genéticamente. Estos investigadores obtuvieron la patente (registro MX/a/201/006840) para la producción de RLs en la derivada no virulenta de la cepa de *P. aeruginosa* PA14 (Figura 3), la cual fue otorgada por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (Gutiérrez-Gómez & Soberón-Chávez, 2024). Esto constituye la primera cepa sobreproductora de RLs en México generada mediante ingeniería genética y con la cual se podría empezar el escalamiento industrial en el país.

La modificación genética de *P. aeruginosa* es un gran avance para la ciencia biotecnológica en México, ya que ha sentado las bases para obtener RLs en mayor proporción y con gran expectativa para extender su uso y aplicación. No obstante, para la construcción de la mutante y la validación de esta, fueron necesarios experimentos complejos y estandarizados que requirieron de tiempo y condiciones experimentales específicas, las cuales podrían no estar disponibles en ciertos grupos de investigación del país. Por esta razón, el aislamiento de *P. aeruginosa* de diversos entornos ambientales (suelo o agua) surge como una alternativa para obtener cepas productoras de RLs.

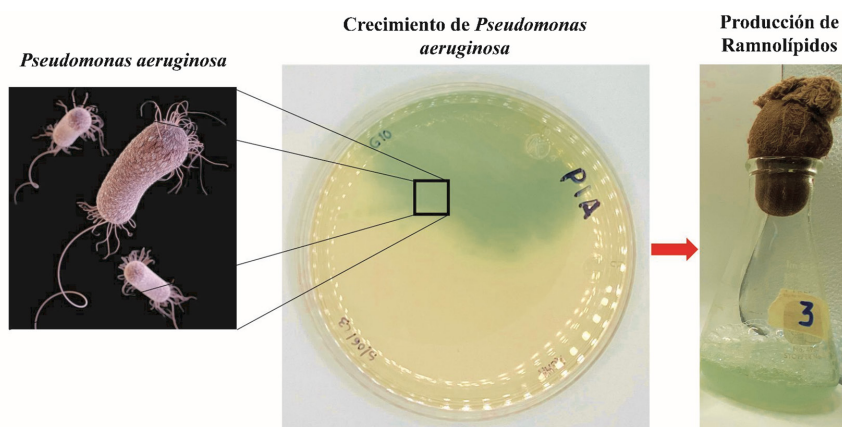


Figura 3. Producción de RLs por *P. aeruginosa*
Fuente: Gutiérrez-Gómez & Soberón-Chávez, 2024

El aislamiento de cepas de *P. aeruginosa* de entornos ambientales, principalmente contaminados con hidrocarburos, abre la posibilidad de usar algunos subproductos de petróleo (el diésel) o aceites comestibles de desecho alimentario como fuentes de carbono, lo que permitiría obtener biosurfactantes de interés industrial a un bajo costo. Esto basado en el hecho de que uno de los principales inconvenientes en



la producción de los RLs es el costo de las fuentes de carbono (glicerol, manitol, fructosa, glucosa, *n*-parafinas, aceites vegetales, entre otros) y de otros nutrientes utilizados en la fermentación, puesto que representan entre el 10 y el 30% del costo total de producción (Cerqueira dos Santos et al., 2024). Sin embargo, el empleo de fuentes de carbono alternativas requiere de procesos de optimización para mejorar la sustentabilidad medioambiental y económica de la producción de RLs.

En México, el aislamiento de cepas de *P. aeruginosa* de dichos hábitats ha tenido particular interés. De hecho, recientemente se identificaron cepas de *P. aeruginosa* aisladas del suelo altamente contaminado con hidrocarburos de la región del valle Tehuacán – Cuicatlán, México (Figura 4). Estas cepas mostraron ser viables para producir RLs usando hexano como fuente de carbono, indicando que se podrían usar subproductos del petróleo para obtener estos compuestos (Huerta-Hernández, 2024). Dichas cepas no solo mostraron capacidad para producir RLs, sino que también pueden producir piocianina (pigmento) en cantidades similares a las de la PAO1 (cepa de *P. aeruginosa* de referencia).

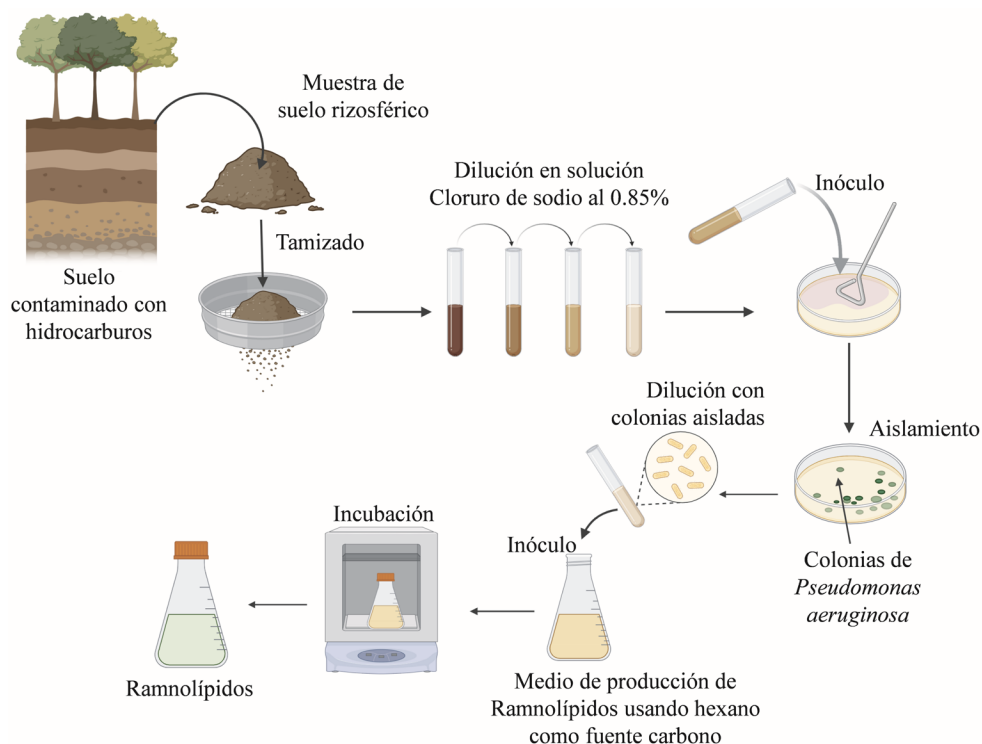


Figura 4. Aislamiento de cepas de *P. aeruginosa* de suelo contaminado con hidrocarburos para la obtención de RLs

Fuente: Propia

Aunque el uso de cepas ambientales es una alternativa para la producción de RLs, preocupaciones referentes a sus factores de virulencia han sido de gran relevancia. Por esta razón, investigaciones recientes, se han enfocado en la inhibición de factores

de virulencia regulados por el sistema sensor de quórum, tales como el uso de ácido galoilquinico (Al-Maddboly et al., 2025) o la harmina (Chen et al., 2024). En tanto, otros grupos de investigación han explorado el uso de nanopartículas con plata para la inhibición de este sistema sensor de quórum (Singh et al., 2015). A pesar de ello, aún permanece abierta la posibilidad de realizar la modificación genética dirigida a la eliminación o atenuación de factores de virulencia específicos en aquellas cepas ambientales para uso biotecnológico industrial.

Por otra parte, aunque se sabe que actualmente no existen productos a base de biosurfactantes en el mercado nacional, la obtención de la derivada no virulenta de la cepa de *P. aeruginosa* PA14 o de cepas ambientales permitiría explorar la producción de RLs en el país. Lo anterior podría abordarse mediante la creación de una empresa de base tecnológica o la transferencia de tecnología a una empresa nacional especializada en desarrollar productos a base de surfactantes (detergentes o productos de higiene personal) o con fines de biorremediación. Es evidente que la implementación de esto puede tener un alto impacto económico inicial. No obstante, al considerar el enorme potencial industrial de los RLs y la alta demanda en el mercado mundial, la puesta en marcha de esta propuesta abriría un área de oportunidad para que nuestro país comience a proyectarse en el mercado mundial como productor de RLs y, entonces, competir con compañías internacionales como: NatSurFact (EE. UU.), AGAE Technologies Ltd. (EE. UU.), Rhamnolipid, Inc. (EE. UU.), GlycoSurf (EE. UU.), TensioGreen (EE. UU.) y Jeneil Biosurfactant (Alemania).

Otras moléculas de interés biotecnológico producidas por *P. aeruginosa*

P. aeruginosa se caracteriza por una enorme capacidad biosintética y versatilidad metabólica, dado que además de producir RLs, esta bacteria es capaz de sintetizar otras moléculas, entre las que se incluyen enzimas, piocianina, lactonas, exopolisacáridos (alginatos) y polímeros de almacenamiento intracelular (polihidroxialcanoatos, PHAs) (Figura 5).

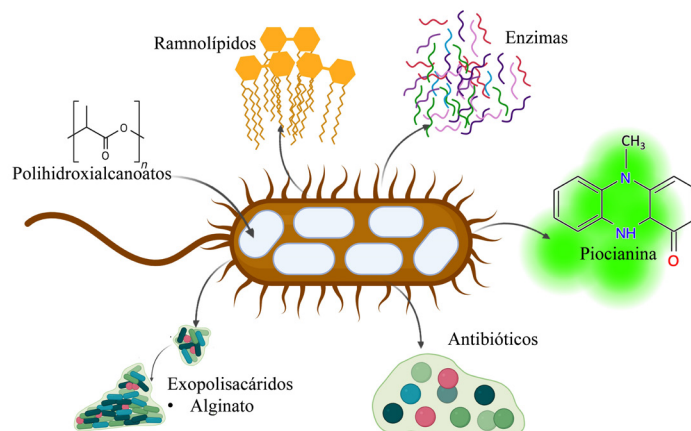


Figura 5. Moléculas de interés biotecnológico producidas por *P. aeruginosa*

Fuente: Propia



En particular, la piocianina, responsable de la coloración azul-verde característica de *Pseudomonas* spp., tiene aplicaciones en medicina, alimentación, productos farmacéuticos, biocontrol, nanotecnología, textiles, acuicultura y agricultura. Su versatilidad y multifuncionalidad la convierten en una sustancia muy prometedora en diversos campos a nivel industrial (Balakrishnan et al., 2022; Jabłońska et al., 2023; Jimmy et al., 2024; Shouman et al., 2023). Por otro lado, los PHAs, biopolímeros compuestos por monómeros de 3-hidroxi-ácidos grasos, se almacenan como reserva energética de la bacteria y se consideran polímeros naturales y prometedores sustitutos de los plásticos petroquímicos. Por ello, han sido utilizados ampliamente en las industrias farmacéuticas, médicas y de envasado debido a su alta biocompatibilidad (Kana-vaki et al., 2021). Además, pueden obtenerse simultáneamente con los RLs, lo que constituiría un proceso de producción aún más sostenible y económicamente viable (Gutiérrez-Gómez et al., 2018).

Conclusiones y perspectivas

Pseudomonas aeruginosa es conocida por producir RLs con diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, México actualmente carece de productos comerciales a base de estas moléculas debido a la ausencia de procesos de producción establecidos. La investigación se ha dirigido al desarrollo de cepas como la no virulenta PA14, que pueden modificarse genéticamente, o bien el aislamiento de cepas ambientales para mejorar la producción de RLs. A medida que se avanza con las investigaciones, el potencial de producción viable podría aumentar al aprovechar fuentes alternativas de carbono e implementar estrategias de optimización, promoviendo así la sostenibilidad ambiental y económica. Para expandir el mercado nacional y reemplazar los surfactantes sintéticos en numerosas aplicaciones, incluida la biorremediación, es crucial estandarizar los procesos de producción a escala industrial. Esta iniciativa requiere la colaboración entre la comunidad científica y la industria, lo que podría posicionar a México para captar una mayor participación en el mercado nacional y mundial de surfactantes.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que este artículo se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Referencias

Al-Maddboly, L. A., El-Salam, M. A., Bastos, J. K., Hasby, E. A., Kushkevych, I., & El-Morsi, R. M. (2025). Anti-biofilm and anti-quorum sensing activities of galloylquinic acid against clinical isolates of multidrug-resistant *Pseudomonas*



- aeruginosa* in open wound infection: *in vitro* and *in vivo* efficacy studies. *BMC Microbiology*, 25(1), 206. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03712-8>
- Arora, J., Ranjan, A., Chauhan, A., Biswas, R., Rajput, V. D., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Minkina, T., & Jindal, T. (2022). Surfactant pollution, an emerging threat to ecosystem: Approaches for effective bacterial degradation. *Journal of Applied Microbiology*, 133(3), 1229–1244. <https://doi.org/10.1111/jam.15631>
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants: A Review for a Green and Sustainable Environment. *Toxics*, 10(8), 484. <https://doi.org/10.3390/toxics10080484>
- Balakrishnan, S., Ameer, A., Pazhur Mohandas, S., Maliyekkal Sajeevan, A. K., Bhaskaran Sathyabhama, A., & Singh, B. (2022). Pyocyanin as a safe aquaculture drug for the control of vibriosis in shrimp recirculating aquaculture system (RAS). *Aquaculture International*, 30(4), 2129–2144. <https://doi.org/10.1007/s10499-022-00890-y>
- Cerqueira dos Santos, S., Araújo Torquato, C., de Alexandria Santos, D., Orsato, A., Leite, K., Serpeloni, J. M., Losi-Guembarovski, R., Romão Pereira, E., Dyna, A. L., Lopes Barboza, M. G., Fernandes Arakawa, M. H., Pires Bitencourt, J. A., da Cruz Silva, S., da Silva Sá, G. C., Dias Rodrigues, P., Quintella, C. M., & Faccin-Galhardi, L. C. (2024). Production and characterization of rhamnolipids by *Pseudomonas aeruginosa* isolated in the Amazon region, and potential antiviral, antitumor, and antimicrobial activity. *Scientific Reports*, 14(1), 4629. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54828-w>
- Chen, P., Qin, J., Su, H. K., Du, L., & Zeng, Q. (2024). Harmine acts as a quorum sensing inhibitor decreasing the virulence and antibiotic resistance of *Pseudomonas aeruginosa*. *BMC Infectious Diseases*, 24(1), 760. <https://doi.org/10.1186/s12879-024-09639-9>
- Chicca, I., Becarelli, S., & Di Gregorio, S. (2022). Microbial Involvement in the Bioremediation of Total Petroleum Hydrocarbon Polluted Soils: Challenges and Perspectives. *Environments*, 9(4), 52. <https://doi.org/10.3390/environments9040052>
- Christova, N., Kabaivanova, L., Nacheva, L., Petrov, P., & Stoineva, I. (2019). Biodegradation of crude oil hydrocarbons by a newly isolated biosurfactant producing strain. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 33(1), 863–872. <https://doi.org/10.1080/13102818.2019.1625725>
- Dittmann, H., Déziel, E., Henkel, M., & Hausmann, R. (2023). Rhamnolipids—Has the promise come true? En G. Soberón-Chávez (ed.), *Biosurfactants* (pp. 69–84). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91697-4.00004-1>



- Eslami, P., Hajfarajollah, H., & Bazsefidpar, S. (2020). Recent advancements in the production of rhamnolipid biosurfactants by *Pseudomonas aeruginosa*. *RSC Advances*, 10(56), 34014–34032. <https://doi.org/10.1039/D0RA04953K>
- Garg, Rajni, Garg, Rishav, Anjum, A., Eddy, N. O., & Watandost, H. (2025). Comprehensive review of the synthesis and sustainable applications of biosurfactants. *Discover Applied Sciences*, 7(10), 1168. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07603-z>
- Gutiérrez-Gómez, U., & Soberón-Chávez, G. (2024). *Método para la construcción de cepas del género Pseudomonas para disminuir su virulencia e incrementar su producción de Ramnolípidos, y productos obtenidos con el mismo* (Patent MX/a/201/006840).
- Gutiérrez-Gómez, U., Soto-Aceves, M. P., Servín-González, L., & Soberón-Chávez, G. (2018). Overproduction of rhamnolipids in *Pseudomonas aeruginosa* PA14 by redirection of the carbon flux from polyhydroxyalkanoate synthesis and overexpression of the rhlAB-R operon. *Biotechnology Letters*, 40(11–12), 1561–1566. <https://doi.org/10.1007/s10529-018-2610-8>
- Huerta-Hernández, R. G. (2024). *Aislamiento y caracterización de cepa de Pseudomonas aeruginosa a partir de suelo potencialmente contaminado con hidrocarburos proveniente de la población de Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca*. Universidad de la Cañada.
- Jabłońska, J., Augustyniak, A., Dubrowska, K., & Rakoczy, R. (2023). The two faces of pyocyanin - why and how to steer its production? *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(4), 103. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03548-w>
- Jimmy, J., Priyaja, P., Puthumana, J., Joseph, V., & Bright Singh, I. S. (2024). Pyocyanin as a promising drug in aquaculture. *Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 12(1), 64–70. https://www.researchgate.net/publication/382657125_Pyocyanin_as_a_promising_drug_in_aquaculture
- Kanavaki, I., Drakonaki, A., Geladas, E. D., Spyros, A., Xie, H., & Tsiotis, G. (2021). Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production in *Pseudomonas* sp. phDV1 Strain Grown on Phenol as Carbon Sources. *Microorganisms*, 9(8), 1636. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081636>
- Mata-Guadarrama, M. A. (2022). *Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos pesados utilizando biosurfactantes y surfactantes químicos* [tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio Institucional UAM. <https://doi.org/10.24275/uama.6734.9922>
- Oluwaseun, A. C., Julius Kola, O., Mishra, P., Ravinder Singh, J., Kumar Singh, A., Singh Cameotra, S., & Oluwasesan Micheal, B. (2017). Characterization and optimization of a rhamnolipid from *Pseudomonas aeruginosa* C1501 with novel biosurfactant activities. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 6, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2017.07.001>



- Phulpoto, I. A., Yu, Z., Li, J., Ndayisenga, F., Hu, B., Qazi, M. A., & Yang, X. (2022). Evaluation of di-rhamnolipid biosurfactants production by a novel *Pseudomonas* sp. S1WB: Optimization, characterization and effect on petroleum-hydrocarbon degradation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 242, 113892. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113892>
- Reynolds, N. (2023). Bioremediation vs. Traditional Remediation Methods: A Comparative Analysis. *Journal of Biodiversity, Bioprospecting and Development*, 9(1), 60–61. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/bioremediation-vs-traditional-remediation-methods-a-comparative-analysis.pdf>
- Rezaei, Z., & Moghimi, H. (2024). Fungal-bacterial consortia: A promising strategy for the removal of petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 280, 116543. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116543>
- Safari, P., Hosseini, M., Lashkarbolooki, M., Ghorbani, M., & Najafpour Darzi, G. (2023). Evaluation of surface activity of rhamnolipid biosurfactants produced from rice bran oil through dynamic surface tension. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(10), 2139–2153. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01660-z>
- Samuel-Osamoka, F. C., Arotupin, D. J., Olaniyi, O. O., & Banat, I. M. (2023). Production of Rhamnolipids by *Pseudomonas aeruginosa* HB6 (39) Isolated from Petroleum-Hydrocarbon Contaminated Environment. *European Journal of Biology and Biotechnology*, 4(3), 1–9. <https://doi.org/10.24018/ejbio.2023.4.3.439>
- Sánchez, C. (2022). A review of the role of biosurfactants in the biodegradation of hydrophobic organopollutants: production, mode of action, biosynthesis and applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(11), 216. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03401-6>
- Shouman, H., Said, H. S., Kenawy, H. I., & Hassan, R. (2023). Molecular and biological characterization of pyocyanin from clinical and environmental *Pseudomonas aeruginosa*. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 166. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02169-0>
- Singh, B. R., Singh, B. N., Singh, A., Khan, W., Naqvi, A. H., & Singh, H. B. (2015). Mycofabricated biosilver nanoparticles interrupt *Pseudomonas aeruginosa* quorum sensing systems. *Scientific Reports*, 5(1), 13719. <https://doi.org/10.1038/srep13719>
- Sinumvayo, J. P. (2015). Agriculture and Food Applications of Rhamnolipids and its Production by *Pseudomonas Aeruginosa*. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000223>
- Soberón-Chávez, G., González-Valdez, A., Soto-Aceves, M. P., & Cocotl-Yañez, M. (2021). Rhamnolipids produced by *Pseudomonas* : from molecular ge-



- netics to the market. *Microbial Biotechnology*, 14(1), 136–146. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13700>
- Tiso, T., Zauter, R., Tulke, H., Leuchtle, B., Li, W.-J., Behrens, B., Wittgens, A., Rosenau, F., Hayen, H., & Blank, L. M. (2017). Designer rhamnolipids by reduction of congener diversity: production and characterization. *Microbial Cell Factories*, 16(1), 225. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0838-y>
- Varjani, S., Rakholiya, P., Yong Ng, H., Taherzadeh, M. J., Hao Ngo, H., Chang, J.-S., Wong, J. W. C., You, S., Teixeira, J. A., & Bui, X.-T. (2021). Bio-based rhamnolipids production and recovery from waste streams: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, 319, 124213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124213>
- Zhao, Y., Sun, Y., Sun, H., Zuo, F., Kuang, S., Zhang, S., & Wang, F. (2024). Surfactant-Based Chemical Washing to Remediate Oil-Contaminated Soil: The State of Knowledge. *Toxics*, 12(9), 648. <https://doi.org/10.3390/toxics12090648>
- Zhuang, X., Wang, Y., Wang, H., Dong, Y., Li, X., Wang, S., Fan, H., & Wu, S. (2022). Comparison of the efficiency and microbial mechanisms of chemical- and bio-surfactants in remediation of petroleum hydrocarbon. *Environmental Pollution*, 314, 120198. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120198>