

Recepción: 03.02.2026

Revisión: 20.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0001-3874-7586>

<https://orcid.org/0000-0002-5494-6972>

EL DIÁLOGO INVISIBLE ENTRE BACTERIAS: DEL QUÓRUM SENSING A LOS BIOFILMS

THE INVISIBLE DIALOGUE BETWEEN BACTERIA: FROM QUORUM SENSING TO BIOFILMS

Alma Cristina Arellano-García ⁽¹⁾;
Nicolas Amaya-Zambrano* ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA), Instituto
Politécnico Nacional, Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal
Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala 90700, Mexico

Correos
aarellanog2401@alumno.ipn.mx,
namayz2400@alumno.ipn.mx
2212562699

Resumen

El *quorum sensing* es un mecanismo de comunicación química que permite a los microorganismos coordinar comportamientos colectivos en función de la densidad celular. A través de la producción, liberación y detección de moléculas señal denominadas autoinductores, las poblaciones microbianas activan programas génicos que regulan procesos como la virulencia, la cooperación metabólica y la formación de biofilms. Los biofilms representan una forma de vida comunitaria altamente organizada, en la que las células se encuentran embebidas en una matriz extracelular que les confiere protección y estabilidad frente a condiciones ambientales adversas y agentes antimicrobianos. En este artículo de divulgación científica se explora la relación funcional entre el *quorum sensing* y la formación de biofilms, destacando cómo la comunicación microbiana integra la regulación del metabolismo comunitario, las interacciones sociales y la arquitectura de estas comunidades. Asimismo, se abordan las perspectivas actuales de investigación, incluyendo estrategias de interferencia de la comunicación (*quorum quenching*) y su potencial aplicación en los ámbitos médico, ambiental e industrial. Comprender estos sistemas de comunicación permite ampliar nuestra visión del mundo microbiano, así como identificar nuevas oportunidades para el control y aprovechamiento de comunidades microbianas complejas.

Palabras clave: *quorum sensing, biofilms, comunicación microbiana, cooperación microbiana, quorum quenching.*

Abstract

Quorum sensing is a chemical communication mechanism that enables microorganisms to coordinate collective behaviors in response to cell population density. Through the production, release, and detection of signaling molecules known as autoinducers, microbial populations activate gene expression programs that regulate processes such as virulence, metabolic cooperation, and biofilm formation. Biofilms represent a highly organized communal lifestyle in which cells are embedded in an extracellular matrix that provides protection and stability against environmental stresses and antimicrobial agents. This scientific outreach article examines the functional relationship between quorum sensing and biofilm formation, emphasizing how microbial communication integrates the regulation of community metabolism, social interactions, and biofilm architecture. Current research perspectives are also discussed, including strategies aimed at disrupting microbial communication (*quorum quenching*) and their potential applications in medical, environmental, and industrial contexts. Understanding these communication systems not only broadens our knowledge of microbial life but also opens new avenues for the control and exploitation of complex microbial communities.

Keywords: *quorum sensing, biofilms, microbial communication, microbial cooperation, quorum quenching.*

Introducción

En el mundo microscópico, la cooperación puede ser cuestión de supervivencia. Lejos de ser organismos aislados, las bacterias intercambian información para coordinar sus acciones. Este fenómeno, conocido como *quorum sensing* (QS), les permite “medir” cuántas son, detectar cambios en su entorno y decidir colectivamente cuándo activar genes implicados en procesos como la virulencia, la bioluminiscencia o la formación de biofilms.

Cada célula produce pequeñas moléculas señal llamadas autoinductores, que se acumulan en el medio hasta alcanzar una concentración crítica. Cuando esto ocurre, las bacterias “saben” que hay suficientes vecinas para emprender una acción conjunta; así, la comunidad responde como una sola entidad, capaz de adaptarse y persistir en condiciones adversas. Uno de los escenarios donde el *quorum sensing* adquiere mayor relevancia es la formación de biofilms, una forma de vida de comunidades microbianas adheridas a superficies y embebidas en una matriz extracelular compuesta por polisacáridos, proteínas y ADN. En esta forma de vida colectiva, los microorganismos ganan

estabilidad, capacidad de intercambio y tolerancia intrínseca a los antimicrobianos (figura 1). El vínculo generado por la comunicación en la comunidad resulta entonces evidente: el *quorum sensing* actúa como el sistema regulador que les permite construir, mantener y dispersar los biofilms. Interferir con esta comunicación puede reducir la formación y maduración de la biopelícula e incluso potenciar la eficacia de los antibióticos, una estrategia conocida como quorum quenching (QQ).

Explorar cómo las bacterias se comunican y organizan invita a repensar conceptos más amplios de cooperación, inteligencia colectiva y adaptación biológica. Entender su lenguaje no sólo tiene valor científico: también abre caminos para nuevas estrategias médicas, industriales y ambientales, donde escuchar—o silenciar— las voces del mundo bacteriano puede marcar la diferencia. El objetivo de este artículo es explicar el papel del *quorum sensing* como mecanismo de comunicación microbiana fundamental en la formación, regulación y mantenimiento de biofilms, destacando su importancia en la cooperación bacteriana y en procesos biotecnológicos.

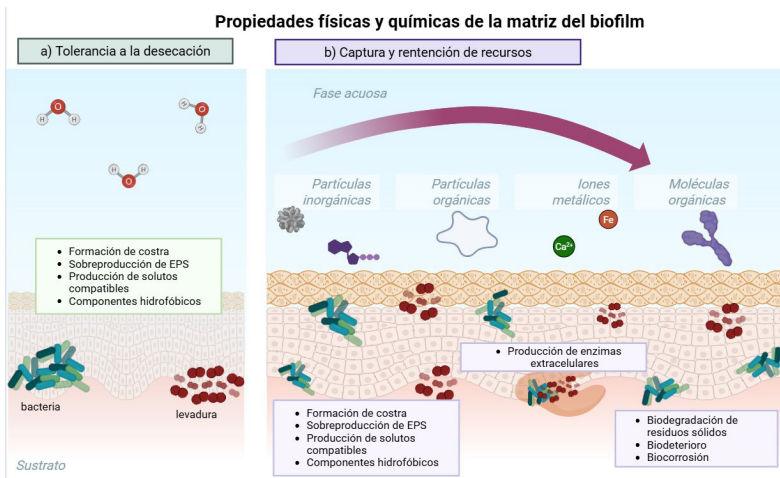


Figura 1. Propiedades fisicoquímicas de la matriz de las biopelículas. Modificada de Flemming et al., 2016.

El lenguaje bacteriano: ¿qué es el quorum sensing?

El QS se basa en la producción, liberación y detección de moléculas señal denominadas autoinductores (AI), las cuales se acumulan en el medio conforme aumenta la cantidad de bacterias. Una vez que la concentración de estas moléculas alcanza un umbral específico, se activa una respuesta coordinada en toda la comunidad. Este sistema regula funciones como la formación de biofilms, la producción de enzimas hidrolíticas, pigmentos, toxinas, factores de virulencia o bioluminiscencia (figura 2) (Abisado et al., 2018).

El quórum sensing se estudia desde 1970 en *Vibrio fischeri* y *Vibrio harveyi*, ambas bacterias producen y responden a la N-acil homoserina lactona (AHL), molécula que al rebasar un nivel inicia

una cascada de traducción que termina en la producción de luciferasa, una enzima involucrada en la bioluminiscencia (Machado et al., 2020).

Aunque los mecanismos de QS difieren entre bacterias Gram negativas y Gram positivas, el principio de comunicación es similar (tabla 1). En las Gram negativas, las señales más comunes son las lactonas de N-acil homoserina (AHLs), que difunden libremente a través de la membrana celular y se unen a receptores citoplasmáticos tipo LuxR para inducir cambios en la transcripción génica (Papenfort & Bassler, 2016). En las Gram positivas, en cambio, la comunicación se realiza mediante péptidos autoinductores que no se difunden libremente y necesitan exportarse (Machado et al., 2020).

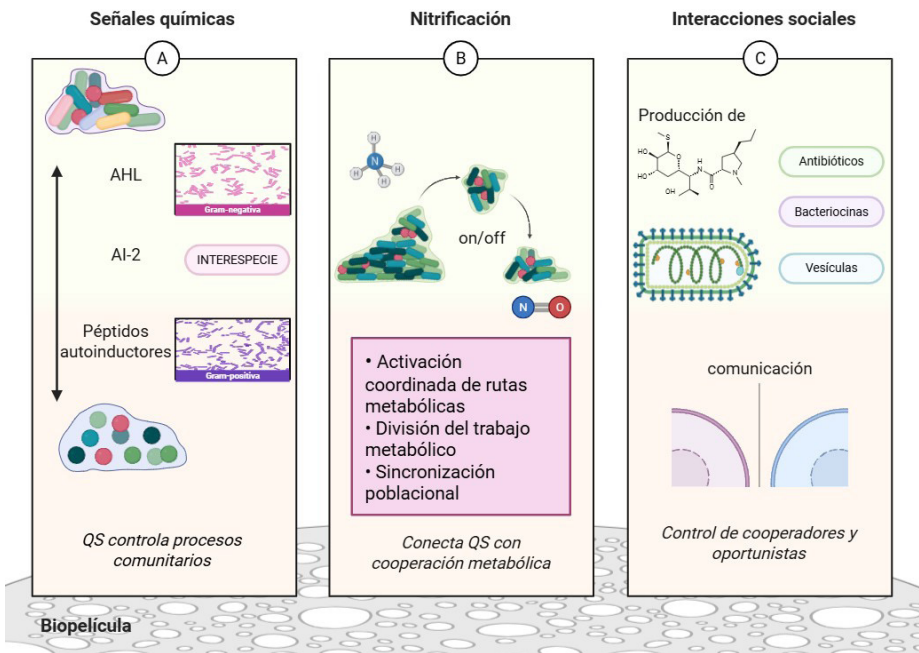


Figura 2. Quorum sensing como integrador de metabolismo, comunicación e interacciones sociales en biofilms. Elaboración propia.

Tabla 1. Tipos de QS y moléculas señal.

Tipo de microorganismo	Molécula señal	Ejemplo de organismo	Función regulada
Bacterias Gram-	AHL (H-SL) Lactona de N acil Homoserina	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Biofilms, virulencia
Bacterias Gram+	Péptidos Autoinductores (AIP)	<i>Staphylococcus aureus</i>	Competencia, toxinas
Multiespecie	Péptido autoinductor AI-2	<i>E. coli</i> y otros	Comunicación interespecie
Hongos	Alcoholes / farnesol	<i>Candida albicans</i>	Morfogénesis, biofilms

En los últimos años, se ha descubierto que el QS no se limita a bacterias individuales o bacterias de una sola especie. Existen sistemas de señalización cruzada que permiten la comunicación entre especies bacterianas e incluso entre distintos dominios biológicos. Por ejemplo, se ha observado que moléculas derivadas del QS bacteriano pueden modular la respuesta inmune del hospedero o influir en la microbiota intestinal y microorganismos eucariotas (Mukherjee & Bash-Sler, 2019). Estos hallazgos han llevado a considerar al QS como un lenguaje químico universal de los ecosistemas microbianos (Kalia et al., 2023).

Un ejemplo de este sistema de comunicación entre especies se encuentra en la placa dental, biofilm que se forma en los dientes y se convierte en sarro dental. La señal AI-2, producida por Gram-positivas y Gram-negativas, desempeña un papel importante en la formación de un biofilm de múltiples especies bacterianas y se ha detectado en seis géneros distintos de bacterias orales. Esta señal tiene relación con la formación de placa dental pues *Porphyromonas gingivalis*, un patógeno dental, puede detectar la señal AI-2 producida por *A. actinomycetemcomitans* (Parashar et al., 2015).

La complejidad de las redes de QS ha sido confirmada por estudios genómicos y de transcriptómica comparativa. En especies como *Pseudomonas aeruginosa*, *Burkholderia cenoce-*

pacia y *Vibrio harveyi*, se han descrito circuitos jerárquicos interconectados, con múltiples sistemas QS que interactúan entre sí para ajustar la respuesta colectiva con precisión. Estos circuitos permiten a las bacterias regular de forma fina la transición entre la vida planctónica (libre) y la vida en comunidad (biofilm), optimizando su adaptación a diferentes nichos ambientales o clínicos (Mukherjee et al., 2023; Fan et al., 2024).

Desde un punto de vista aplicado, comprender el *quorum sensing* ha abierto nuevas rutas para controlar o aprovechar la comunicación bacteriana. En el campo biomédico, los inhibidores de QS o estrategias de *quorum quenching* (QQ) bloquean la señalización para evitar la formación de biofilms e infecciones persistentes, reduciendo la virulencia sin ejercer presión selectiva sobre las bacterias (Kalia et al., 2023; D'Aquila et al., 2024). En contraste, en biotecnología ambiental y alimentaria, el aprovechamiento controlado del QS se explora para estimular consorcios microbianos beneficiosos para la degradación de contaminantes, la producción de enzimas y la fermentación de sustratos complejos (Zhang et al., 2023).

En suma, el QS es un lenguaje molecular de cooperación que transforma la visión clásica de las bacterias como seres aislados. Entender su funcionamiento no solo ilumina los mecanismos que sustentan la organización microbiana, sino que

ofrece herramientas innovadoras para el control, aprovechamiento y diseño de comunidades bacterianas en salud, industria y medio ambiente.

Biofilms: ciudades microbianas

Un biofilm es un hidrogel con ecosistemas complejos formados por una o más especies bacterianas, con 108 a 10¹¹ células por gramo de peso húmedo, ofrece protección ante el estrés ambiental e incrementa su tolerancia a factores externos. La formación de un biofilm bacteriano es un fenómeno complejo determinado por procesos físicos, químicos y biológicos. Este proceso se ha estudiado extensivamente in vitro con variedad de condiciones y microorganismos, y se puede describir como un proceso de cuatro etapas: fijación (en una superficie inanimada o un tejido), crecimiento sésil, maduración y desprendimiento/dispersión (figura 3) (Markowska et al., 2024).

Etapas de fijación y crecimiento sésil: Las fases iniciales involucran la fijación y cohesión reversible del microorganismo a una superficie sólida por interacciones gravitacionales, electrostáti-

cas y fuerzas de Van der Waals o por estructuras bacterianas como el flagelo o pili. A continuación, comienza la unión irreversible de la bacteria a la superficie y la producción de la matriz extracelular. Durante esta fase irreversible las células bacterianas interactúan con la superficie mediante adhesinas y lipopolisacáridos. La intensidad de la unión depende principalmente de las especies, el número de microorganismos que se adhieren a la superficie y de las características fisicoquímicas de la superficie. La velocidad y extensión del crecimiento del biofilm dependen del flujo de líquido, movimiento browniano, disponibilidad de nutrientes y hierro, pH, osmolalidad, concentración de oxígeno, presencia de agentes antimicrobianos y temperatura ambiente.

Etapas de maduración: Esta etapa se asocia al incremento en la densidad celular y reducción del crecimiento de ciertas células donde las interacciones entre los microorganismos y el hospedador son cruciales. La arquitectura de las biopelículas maduras puede variar desde formas planas y homogéneas hasta estructuras organizadas con torres de células encapsuladas y espacios vacíos.

Ciclo de formación de biofilms

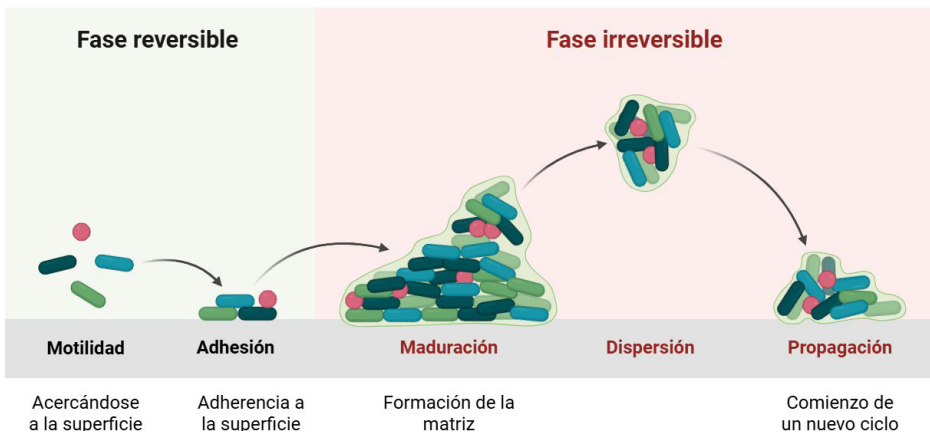


Figura 3. Ciclo de formación de biopelículas. Modificada del software Biorender.

Etapa de desprendimiento: Para evitar una sobrepoblación que reduzca el acceso a nutrientes vitales y acumule productos de desecho dañinos, las células bacterianas se desprenden del biofilm y migran como formas planctónicas -libres- (Markowska et al., 2024).

Un biofilm tiene dos capas: la más externa se llama piel y tiene contacto con el exterior, la siguiente es la matriz formada por polisacáridos, celulosa, proteínas, lípidos y ADN extracelular. La piel es una barrera contra la deshidratación, mientras que la matriz tiene diferentes zonas y viscosidades que dan estructura a la película, almacenan agua, nutrientes, iones y ADN; la composición y estructura de la matriz pueden cambiar en el tiempo debido a factores externos e internos.

Tal como en una ciudad conviven personas de origen diferente, en un biofilm coexisten especies bacterianas distintas que forman “barrios” o diferentes hábitats localizados a pequeña escala. Las zonas se pueden diferenciar por la cantidad de oxígeno, que será diferente entre la piel y matriz y determinará el tipo de bacterias que vivan en ellas. Los barrios pueden estar separados por pocos micrómetros (figura 4).

Las estructuras y formación de biofilms son diversas (figura 5), ya que muchas de las bacterias que causan infecciones crónicas relacionadas a biofilms, no están adheridas a una superficie sólida, sino que pueden formarse como agregados o gránulos que flotan en hábitats acuáticos. Modificada de Flemming et al., 2016.

Los biofilms presentan heterogenicidad e interacciones sociales

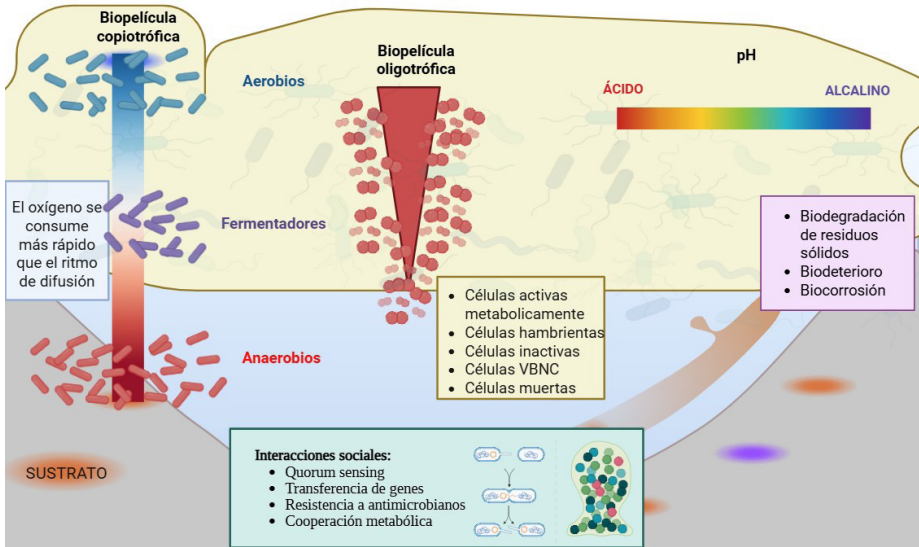


Figura 4. Interacciones entre los microorganismos y el desarrollo de la biopelícula.

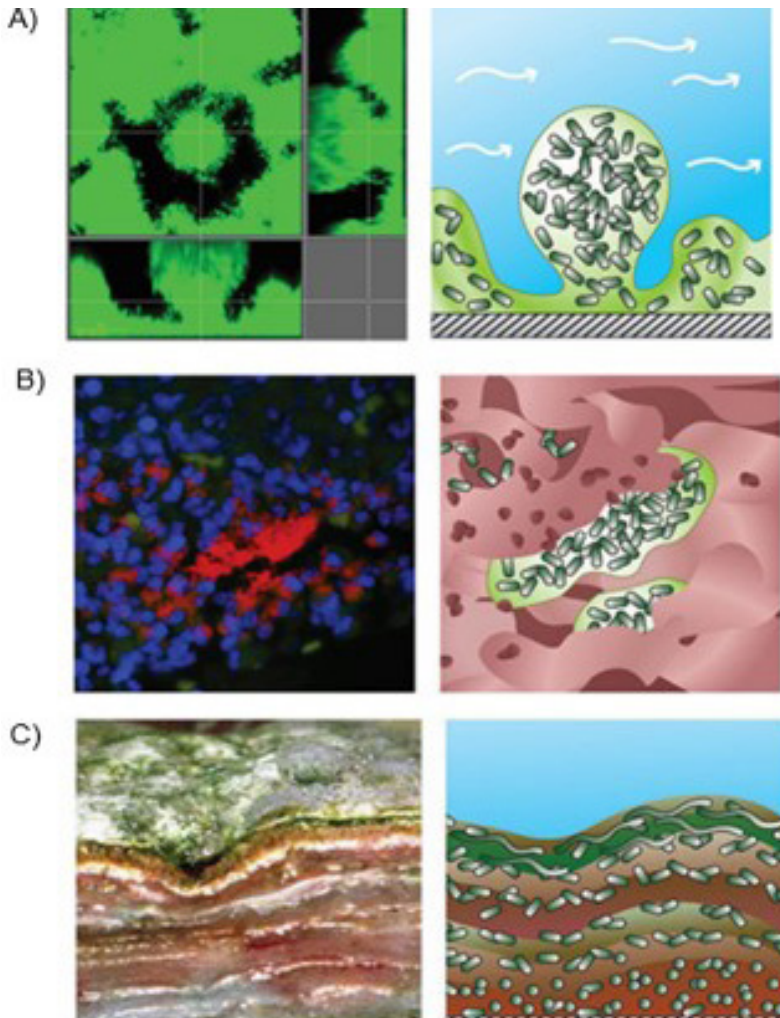


Figura 5. Variedad de estructuras de un biofilm que muestra las diferencias entre biofilms in vivo e in vitro. Las imágenes originales se muestran de lado izquierdo y un dibujo esquemático del lado derecho con el agua en color azul, las células de microorganismos en color verde oscuro, las sustancias poliméricas extracelulares de color verde claro, células hospedadoras y otros materiales como moco o tejido en color rojo y superficies sólidas en color gris rayado. A) Estructura tipo hongo de estudio in vitro de *Pseudomonas aeruginosa* en una célula (Sauer et al., 2022). B) Agregados de *P. aeruginosa* rodeados por leucocitos en tejido de pulmón con fibrosis quística (Kirketerp-Møller et al., 2008). C) Tapete microbiano aislado de un lago en Brasil (Vasconcelos et al., 2006)

Quorum sensing y biofilms

Actualmente la relación entre *quorum sensing* y biofilms se continúa investigando pues si bien están relacionados, no se puede afirmar que el QS controle la formación de biofilms, sin embargo, se ha encontrado evidencia de su influencia en diferentes etapas de desarrollo y funciones del biofilm en diversas especies microbianas (tabla 2), a continuación, se mencionarán algunos ejemplos.

Vibrio cholerae, el patógeno que causa el cólera, utiliza el QS para formar una biopelícula que le permite sobrevivir a condiciones de estrés dentro del huésped y promover la infección en el intestino (Saha et al., 2023). *Staphylococcus aureus* puede generar biofilms en tejidos o dispositivos médicos y provocar una infec-

ción en mamíferos, difícil de tratar por su resistencia a los antibióticos. El sistema de QS de *S. aureus* mediado por el péptido autoinductor (AIP) está involucrado en las etapas de adhesión, maduración y dispersión del biofilm (Peng et al., 2022).

Helicobacter pylori es una bacteria que vive en el tracto gastrointestinal humano y se considera la causa más común de gastritis, úlcera péptica y cáncer gástrico. *H. pylori* forma un biofilm en la superficie de la mucosa gástrica que se relaciona con la señal de lactona de N-acil homoserina de QS que regula varias etapas del desarrollo del biofilm desde la adhesión hasta el desprendimiento de células (Aanniz et al., 2022).

Tabla 2. Relación entre quorum sensing y etapas del biofilm

Etapas del biofilm	Rol del quorum sensing	Resultado biológico
Adhesión inicial	Activación de adhesinas	Fijación a superficie
Maduración	Producción de EPS	Estructura estable
Organización	Regulación metabólica	Cooperación
Dispersión	Represión/activación selectiva	Colonización de nuevos nichos

Perspectivas y aplicaciones

En los últimos años, el estudio del *quorum sensing* (QS) ha adquirido una relevancia creciente al proponerse como una alternativa conceptual al uso tradicional de antibióticos. En lugar de eliminar directamente a los microorganismos, las estrategias basadas en la interferencia de la comunicación microbiana buscan reducir la virulencia, desorganizar los biofilms y hacer a las bacterias más vulnerables a tratamientos convencionales (sensibilizar). Este enfoque, conocido como *quorum quenching* (QQ), ha sido ampliamente revisado en el contexto de infecciones asociadas a biofilms, donde la tolerancia a antimicrobianos representa uno de los principales desafíos clínicos actuales (D'Aquila et al., 2024; Patel et al., 2024).

Una de las aplicaciones más prometedoras del QS y QQ en el ámbito médico es el control de infecciones crónicas asociadas a dispositivos implantables como catéteres, prótesis y válvulas. Investigaciones recientes han demostrado que la combinación de inhibidores de QS con antibióticos puede potenciar la eficacia terapéutica, al debilitar la estructura del biofilm y reducir la expresión coordinada de factores de virulencia (Wang et al., 2024). De forma paralela, se están desarrollando recubrimientos inteligentes para superficies médicas que incorporan propiedades antiadhesivas y anti-QS, con el objetivo de prevenir la colonización microbiana desde las etapas iniciales. Más allá del contexto clínico, el control del QS tiene aplicaciones relevantes en la industria alimentaria y

en la microbiología ambiental. En plantas de procesamiento de alimentos, los biofilms pueden actuar como reservorios persistentes de microorganismos contaminantes que afectan la seguridad y calidad de los productos. En este escenario, se ha incrementado el interés por inhibidores naturales del QS, derivados de plantas, algas o microorganismos, debido a su bajo impacto toxicológico y su potencial uso como agentes de biocontrol (Shariati et al., 2024). Estrategias similares se exploran en sistemas acuáticos e industriales para reducir la bioincrustación y la biocorrosión.

En contraste con los enfoques orientados a inhibir biofilms, una perspectiva complementaria consiste en aprovechar biofilms funcionales para fines biotecnológicos. La comprensión de cómo el QS regula la cooperación metabólica ha permitido diseñar consorcios microbianos más estables y eficientes, capaces de realizar procesos complejos como la degradación de contaminantes, la depuración de aguas residuales o la producción

de metabolitos de interés industrial. En este contexto, el QS no se interpreta como un blanco terapéutico, sino como una herramienta para optimizar la organización y el rendimiento de comunidades microbianas artificiales (Yang et al., 2023).

Finalmente, el futuro del campo está estrechamente ligado al desarrollo de nuevas metodologías analíticas. El uso integrado de genómica, transcriptómica, metabolómica, microscopía avanzada e inteligencia artificial está permitiendo mapear con mayor precisión las redes de comunicación y las interacciones espaciales en los biofilms. Estos enfoques están transformando el estudio del QS desde una visión simplificada hacia una comprensión más sistémica, reconociendo la comunicación microbiana como un componente central de la adaptación, la persistencia y la evolución de las comunidades microbianas (Liu et al., 2024; Nguyen et al., 2025).

Conclusiones

El QS ha revelado que la vida microbiana está lejos de ser un conjunto de acciones aisladas. A través de señales químicas simples, los microorganismos son capaces de coordinar comportamientos colectivos que les permiten adaptarse, persistir y prosperar en entornos cambiantes. Entre estas estrategias, la formación de biofilms destaca como una de las más eficaces, al ofrecer protección, estabilidad y ventajas evolutivas frente a condiciones adversas.

Comprender la comunicación microbiana y su relación con la vida en comunidad ha permitido explicar fenómenos clave en salud, industria y medio ambiente, desde infecciones persistentes hasta procesos bio-

tecnológicos controlados. Más aún, este conocimiento ha impulsado nuevas formas de intervención que no buscan eliminar a los microorganismos, sino modular su comportamiento, abriendo el camino a estrategias más sostenibles y menos propensas a generar resistencia.

El estudio del quorum sensing y biofilms invita a replantear nuestra visión de los microorganismos: no como entidades simples, sino como sistemas cooperativos altamente organizados. Escuchar y comprender su lenguaje químico amplía las fronteras de la microbiología y ofrece herramientas valiosas para enfrentar algunos de los retos científicos y tecnológicos más urgentes de nuestro tiempo.

Conflicto de interés

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

Declaración de privacidad

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.

Referencias

- Aanniz, T., Bakri, W., El Mazouri, S., Wakrim, H., Kandoussi, I., Belyamani, L., Ouadghiri, M., & Ibrahim, A. (2022). Biofilm and Quorum Sensing in *Helicobacter pylori*. En T. Das (Ed.), *Focus on Bacterial Biofilms*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104568>
- Coolahan, M., Browne, H. P., & Cotter, P. D. (2025). Quorum sensing-mediated interactions between bacteria and eukaryotes in marine systems. *Communications Biology*, 8, Article 112. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-XXXX-X>
- Costerton, J. W., Stewart, P. S., & Greenberg, E. P. (1999). Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections. *Science*, 284(5418), 1318–1322. <https://doi.org/10.1126/science.284.5418.1318>
- D'Aquila, P., Giordano, G., & Bellavia, D. (2024). Quorum quenching approaches against bacterial biofilm infections. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1298476. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1298476>
- Donlan, R. M. (2001). Biofilms and device-associated infections. *Emerging Infectious Diseases*, 7(2), 277–281. <https://doi.org/10.3201/eid0702.010226>
- Flemming, H.-C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623–633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- Flemming, H.-C., Wingender, J., Szewzyk, U. et al. (2016). Biofilms: an emergent form of bacterial life. *Nat Rev Microbiol* 14, 563–575 (2016). <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>
- Fuqua, C., Winans, S. C., & Greenberg, E. P. (1994). Quorum sensing in bacteria: The LuxR–LuxI family of cell density-responsive transcriptional regulators. *Journal of Bacteriology*, 176(2), 269–275. <https://doi.org/10.1128/jb.176.2.269-275.1994>
- Kalia, V. C. (2013). Quorum sensing inhibitors: An overview. *Biotechnology Advances*, 31(2), 224–245. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.10.004>
- Liu, H.-Y., Li, X., & Chen, J. (2024). Mechanisms of antimicrobial resistance in biofilms. *Nature Reviews Bioengineering*, 2, 45–61. <https://doi.org/10.1038/s44222-023-000XX-X>
- Machado, I., Silva, L., Giaouris, E., Melo, L., & Simões, M. (2020). Quorum sensing in food spoilage and natural-based strategies for its inhibition. *Food Res Int.*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108754>
- Markowska, K., Szymanek-Majchrzak, K., Pituch, H., & Majewska, A. (2024). Understanding Quorum-Sensing and Biofilm Forming in Anaerobic Bacterial Communities. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), 12808. <https://doi.org/10.3390/ijms252312808>
- Miller, M. B., & Bassler, B. L. (2001). Quorum sensing in bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 55, 165–199. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.165>
- Nguyen, D., Singh, P. K., & Bassler, B. L. (2025). Quorum sensing: Not just a bridge between bacteria. *Microorganisms*, 13(1), 102. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010102>
- Papenfort, K., & Bassler, B. L. (2016). Quorum sensing signal-response systems in Gram-negative bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 576–588. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.89>
- Parashar, A., Parashar, S., Zingade, A., Gupta, S., & Sanikop, S. (2015). Interspecies communication in oral biofilm: An ocean of information. *Oral Science International*, 12(2), 37–42. [https://doi.org/10.1016/S1348-8643\(15\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S1348-8643(15)00016-6)

- Parsek, M. R., & Greenberg, E. P. (2005). Sociomicrobiology: The connections between quorum sensing and biofilms. *Trends in Microbiology*, 13(1), 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.11.007>
- Patel, K., Gupta, R., & Sharma, A. (2024). Combatting antibiotic resistance by exploring the promise of quorum quenching. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 170, 115503. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.115503>
- Peng, Q., Tang, X., Dong, W., Sun, N., & Yuan, W. (2022). A Review of Biofilm Formation of *Staphylococcus aureus* and Its Regulation Mechanism. *Antibiotics*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12010012>
- Saha, S., Aggarwal, S., & Singh, D. V. (2023). Attenuation of quorum sensing system and virulence in *Vibrio cholerae* by phytomolecules. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1133569. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1133569>
- Shariati, A., Azimi, T., & Ardebili, A. (2024). Natural compounds targeting quorum sensing and biofilm formation. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1342219. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1342219>
- Wang, J., Liu, Y., & Zhang, X. (2024). Quorum-quenching enzymes combined with antibiotics against bacterial biofilms. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1301184. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1301184>
- Yang, S., Wu, Y., & Chen, Y. (2023). Biofilm tolerance, resistance and infections: Increasing challenges. *Microbial Cell*, 10(6), 145–158. <https://doi.org/10.15698/mic2023.06.789>