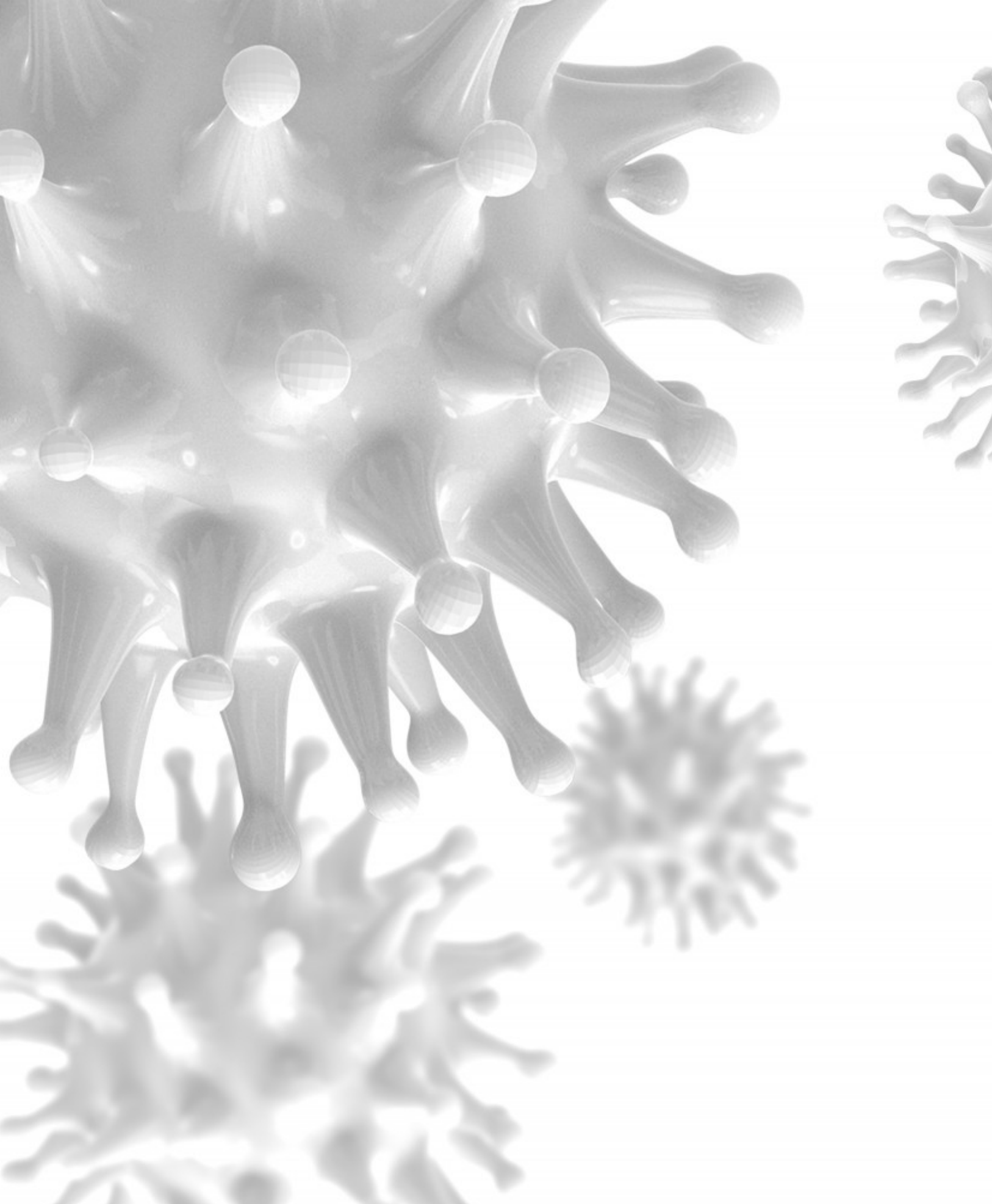
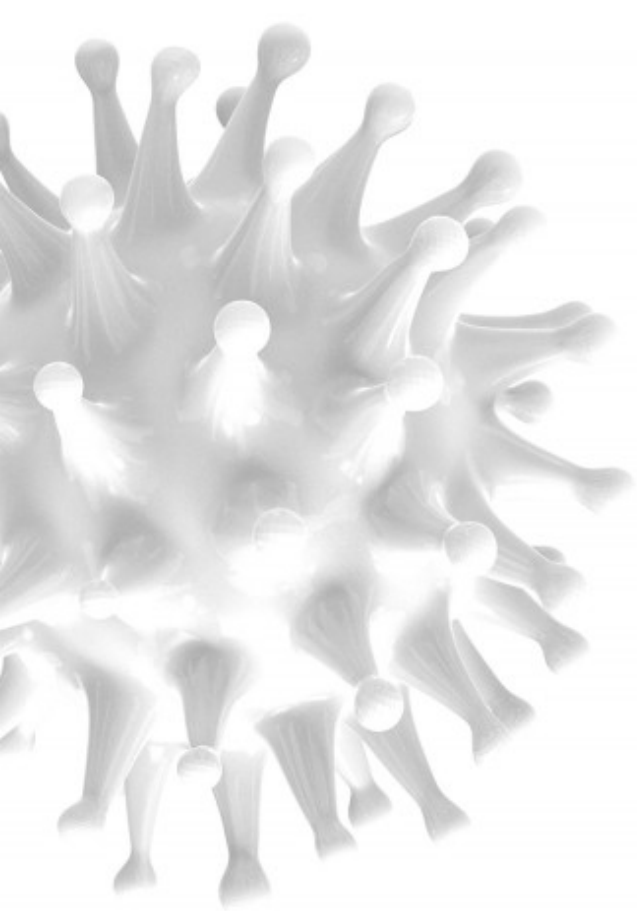






Bacteriocinas: armas naturales contra bacterias y aliadas en la salud y la alimentación

Claudia López-Sánchez¹, Felipe de Jesús Palma-Cruz², Adriana Palacios Jauri²

Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Oaxaca. ¹Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. ²División de Estudios de Posgrado e Investigación. Avenida Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125, esquina Calzada Tecnológico, C.P 68030. Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.

Claudia López Sánchez claudia.lopez@itoaxaca.edu.mx

Felipe de Jesús Palma Cruz pcruz@itoaxaca.edu.mx

Adriana Palacios Jauri m24160076@itoaxaca.edu.mx

Autor de correspondencia: claudia.lopez@itoaxaca.edu.mx

Resumen

Las bacteriocinas son péptidos antimicrobianos producidos principalmente por bacterias ácido-lácticas, y su importancia se extiende más allá de la conservación de alimentos. En la industria farmacéutica, las bacteriocinas se investigan como alternativas innovadoras a los antibióticos convencionales, especialmente para combatir infecciones causadas por bacterias resistentes. Su capacidad para inhibir microorganismos patógenos sin afectar negativamente la microbiota benéfica las convierte en candidatas ideales para el desarrollo de nuevos medicamentos. Además, se exploran aplicaciones en la formulación de productos tópicos para tratar infecciones cutáneas, en la elaboración de recubrimientos antimicrobianos para dispositivos médicos y en terapias combinadas con probióticos para potenciar la salud intestinal, así como su papel emergente como psicobióticos en la modulación del eje intestino-cerebro. El potencial de las bacteriocinas en la farmacéutica también incluye su uso en la prevención de infecciones hospitalarias y en el diseño de tratamientos personalizados, contribuyendo así a la seguridad y eficacia de los procedimientos médicos. Asimismo, los fermentados tradicionales, como el mezcal, se revelan como fuentes inexploradas de cepas bacteriocinógenas, mientras que la nanotecnológica y los biopolímeros amplían sus aplicaciones biotecnológicas. En resumen, las bacteriocinas representan una herramienta prometedora para enfrentar los retos actuales de la resistencia antimicrobiana y mejorar la calidad de la atención médica y la seguridad alimentaria.

Palabras clave: Bacteriocinas, bacterias ácido-lácticas, bioconservación, resistencia antimicrobiana, biotecnología.



Abstract

Bacteriocins are antimicrobial peptides produced primarily by lactic acid bacteria, and their importance extends beyond food preservation. In the pharmaceutical industry, bacteriocins are being investigated as innovative alternatives to conventional antibiotics, especially to combat infections caused by resistant bacteria. Their ability to inhibit pathogenic microorganisms without negatively affecting the beneficial microbiota makes them ideal candidates for the development of new drugs. In addition, applications are explored in the formulation of topical products to treat skin infections, in the development of antimicrobial coatings for medical devices, and in combination therapies with probiotics to enhance gut health, as well as their emerging role as psychobiotics in modulating the gut-brain axis. The potential of bacteriocins in the pharmaceutical industry also includes their use in the prevention of nosocomial infections and in the design of personalized treatments, thus contributing to the safety and efficacy of medical procedures. Furthermore, traditional fermented beverages, such as mezcal, emerge as unexplored sources of bacteriocinogenic strains, while nanotechnology and biopolymers expand their biotechnological applications. In summary, bacteriocins represent a promising tool to address the current challenges of antimicrobial resistance and improve the quality of medical care and food safety.

Keywords: Bacteriocins, lactic acid bacteria, biopreservation, antimicrobial resistance, biotechnology.



Introducción

Las bacterias ácido-lácticas (BAL), son microorganismos presentes en bebidas fermentadas, productoras de péptidos antimicrobianos conocidos como bacteriocinas que utilizan para contender con otras especies. Estas moléculas han demostrado un notable potencial como agentes antimicrobianos frente a bacterias multirresistentes, e incluso contra especies fúngicas, virales y estructuras complejas como las biopelículas bacterianas (Cintas et al., 2001; Simons et al., 2020).

En la industria alimentaria actualmente, las bacteriocinas se emplean en una extensa variedad de alimentos, tales como productos cárnicos, lácteos, enlatados, productos del mar, vegetales, jugos de frutas y bebidas como cerveza y vino, convirtiéndose en componentes clave para garantizar la inocuidad y prolongar la vida útil de los alimentos.

Descubiertas hace casi un siglo, las bacteriocinas siguen generando gran interés por su capacidad para inhibir microorganismos patógenos. Su eficacia y seguridad las posicionan como una alternativa prometedora frente a los conservantes químicos y los antibióticos tradicionales, lo que representa un avance significativo en la protección de la salud y la innovación alimentaria (Balciunas et al., 2013). Las bacteriocinas derivadas de bacterias ácido-lácticas (BAL) cuentan con el estatus *Generally Regarded As Safe* (GRAS, Generalmente Reconocidas como Seguras) otorgado por la FDA. Al ser degradadas con facilidad por enzimas proteolíticas del tracto gastrointestinal, se consideran inocuas para el consumo humano (Simons et al., 2020; El-Sayed et al., 2023)

No obstante, su aplicación industrial enfrenta ciertos retos, como su producción y purificación que podrían ser de alto costo e impacta en el número de bacteriocinas obtenidas y homogeneidad (Hernández Figueroa et al., 2024). Algunas bacteriocinas presentan un espectro antimicrobiano pequeño, lo que puede limitar su eficacia frente a una amplia gama de patógenos (El-Sayed et al., 2023). Esas desventajas pueden enmendarse, y ampliar su espectro de acción, para incluir patógenos como *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus cereus* (Revutskaya et al., 2024), combinando las bacteriocinas con otros tratamientos emergentes en la industria alimentaria, como sustancias químicas, sistema lactoperoxidasa, altas presiones hidroestáticas, nanopartículas, bacteriófagos y aceites esenciales.

Las mejores combinaciones del uso de las bacteriocinas y tecnologías emergentes son bacteriocinas y nanopartículas, y bacteriocinas con bacteriófagos, cuyas combinaciones inhiben el crecimiento tanto de bacterias Gram positivas como de Gram negativas, entre las ventajas están: fáciles de aplicar en los alimentos, pueden ser de bajo costo, no cambian las características sensoriales del producto, permiten combatir la resistencia antimicrobiana, y destruyen completamente a los microorganismos sin darles oportunidad de recuperación durante el periodo de maduración o almacenamiento.

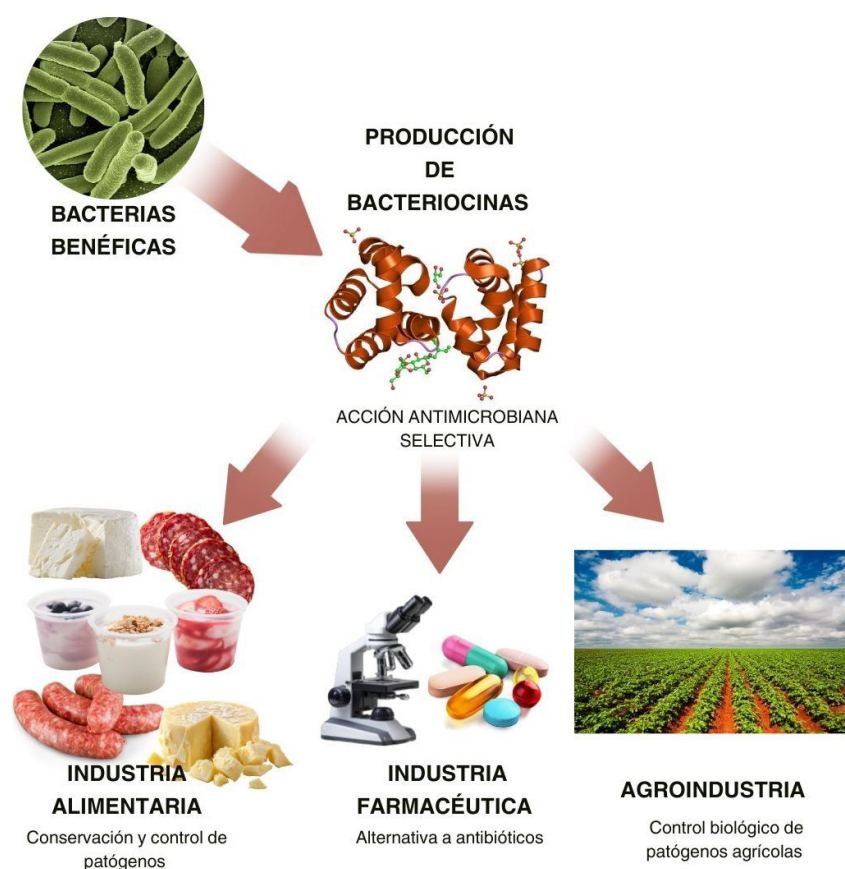


Figura 1. La importancia de las bacteriocinas en la industria

Metodología de revisión

Se realizó una revisión narrativa de la literatura científica sobre bacteriocinas producidas por bacterias ácido-lácticas (BAL), sus mecanismo de acción, clasificación taxonómica y aplicaciones en biopreservación de alimentos y salud humana. La búsqueda se efectuó en las bases de datos PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar, utilizando descriptores en inglés y español como: "*bacteriocins*", "*lactic acid bacteria*", "*antimicrobial resistance*", "*biopreservation*", "*food safety*", "*psychobiotics*", "*mezcal fermentation*" y "*traditional fermented foods*".

El periodo de búsqueda abarcó publicaciones desde 2001 hasta 2026, con énfasis prioritario en literatura de los últimos cinco años (2020 – 2026) para garantizar la actualidad del análisis. Se incluyeron artículos de revisión, artículos originales, capítulos de libro y documentos técnicos de organismos internacionales. Los criterios de inclusión priorizaron estudios que abordan mecanismos de acción a nivel molecular, aplicaciones biotecnológicas innovadoras y caracterización microbiológica de fermentados tradicionales. La selección final comprendió 19 referencias que sintetizan el estado del arte y las perspectivas futuras del campo.



Mecanismos de acción de las bacteriocinas

Las bacteriocinas son péptidos de bajo peso molecular (30-60 aminoácidos) sintetizados ribosomalmente. Su notable capacidad antimicrobiana no es casualidad; radica en su naturaleza estructural. La mayoría posee un carácter catiónico (carga positiva) y anfipático (con regiones hidrofóbicas e hidrofílicas), lo que les permite interactuar electrostáticamente con las membranas celulares de las bacterias diana, las cuales presentan una carga neta negativa. A partir de esta interacción, sus mecanismos de acción se pueden agrupar en dos grandes vías:

- En primer lugar, la disrupción de la integridad de la membrana celular. Este es el mecanismo más común, especialmente en las bacteriocinas producidas por bacterias grampositivas. Tras unirse a los receptores específicos en la superficie bacteriana, los péptidos se insertan en la bicapa lipídica formando poros. Esta perforación provoca una pérdida irreversible del potencial de mem-

brana y la fuga descontrolada de moléculas vitales intracelulares, como iones, ATP y péptidoglicanos, conduciendo a la lisis y la muerte celular (Simons et al., 2020; Revutskaya et al., 2024).

En segundo lugar, la **Inhibición enzimática y de macromoléculas**. Algunas bacteriocinas no solo destruyen la membrana, sino que bloquean procesos intracelulares críticos; por ejemplo, inhibiendo la biosíntesis de la pared celular de peptidoglicano. Por su parte, ciertas bacteriocinas producidas por bacterias gramnegativas

logran interiorizarse y ejercen actividad nuclear, degradando ácidos nucleicos (ADN, ARN) o inhibiendo la síntesis de proteínas, lo que paraliza por completo los procesos de replicación y transcripción de la bacteria patógena (Simons et al., 2020).

Estas propiedades que atacan múltiples dianas celulares simultáneamente son las que las convierten en armas naturales tan eficaces para controlar bacterias competidoras y patógenas, dificultando además el desarrollo de resistencia.



Clasificación de las bacteriocina

La clasificación de las bacteriocinas ha sido un desafío para la comunidad científica debido a la inmensa diversidad estructural, funcional y genética de estos péptidos, así como al descubrimiento constante de nuevas variantes con propiedades híbridas (Simons et al., 2020). A lo largo de las últimas décadas, la taxonomía de estas moléculas ha experimentado una evolución fascinante, impulsada por el avance de la biología molecular y las bases de datos genómicas.

De la clasificación clásica al consenso moderno

Inicialmente, la clasificación más aceptada fue la que dividía a las bacteriocinas en cuatro clases basándose en su tamaño, termoestabilidad y presencia de modificaciones postraduccionales. Con el tiempo, algunos autores expandieron este modelo a cinco clases, para agrupar a los péptidos de estructura circular (Mokoena, 2017).

Sin embargo, la aparición de nuevas bacteriocinas y el refinamiento de las técnicas de purificación obligaron a replantear el esquema. La "Clase IV" (que agrupaba a grandes complejos proteicos con carbohidratos o lípidos) fue cuestionada por investigadores que demostraron que muchos de estos complejos no eran clases reales, sino artefactos de purificación incompleta. Finalmente, basado en características genéticas, bioquímicas y estructurales, se ha establecido un sistema de tres clases principales. (El-Sayed et al., 2023). Un resumen de esta clasificación actualizada, que sintetiza las características, dianas moleculares y ejemplos de cada grupo se presenta en la Tabla 1.

Clase I: Los lantibióticos

Esta clase comprende péptidos pequeños (< 5kDa) y termoestables, cuya marca es la presencia de modificaciones postraduccionales como la lantionina, β -lantionina, dehidroalanina y dehidrobutirina. Estos anillos intramoleculares les otorgan una rigidez estructural que los hace altamente resistentes al calor y las proteasas. Los lantibióticos se dividen en:

- **Subclase Ia (Lineales):** Su representante más emblemático es la nisina, producida por *Lactococcus lactis*. La nisina posee una estructura con dos dominios funcionales: el dominio N-terminal, que se une con alta afinidad al Lípido II de la membrana bacteriana y el dominio C-terminal, que se inserta en la membrana formando poros. Esta doble acción provoca la fuga descontrolada de iones ATP y aminoácidos, llevando a la célula a la muerte. Recientemente, se han descubierto variantes como la nisina U, aislada de *Streptococcus uberis*, que comparte un 78% de similitud con la nisina A (El-Sayed et al., 2023).

- **Subclase Ib (Globulares):** A diferencia de los lineales, estos péptidos adoptan una estructura tridimensional compacta y globular, siendo la mersacidina su ejemplo clásico.

Clase II: Péptidos pequeños termoestables no modificados

Es la clase más heterogénea y numerosa. Abarca péptidos de hasta 10 kDa, termoestables, que no contienen lantionina ni otras modificaciones postraduccionales inusuales. Poseen una estructura anfifílica (con regiones hidrofóbicas e hidrofílicas) que les permite interactuar con las membranas diana. Se subdividen en tres grupos funcionales:

- **Subclase IIa (Tipo pediocina):** Reconocida por su potente actividad antilisterial. Poseen una estructura en el extremo N-terminal en forma de hoja plegada y una hélice alfa en el C-terminal. Al unirse a receptores específicos como el sistema Man-PTS (Sistema de Fosfotransferasa de Manosa), disipan la fuerza motriz de protones y agotan al ATP intracelular.
- **Subclase IIb (Bacteriocinas de dos péptidos):** Son heterodímeros que requieren la sinergia de dos péptidos distintos (generalmente denominados α y β) para lograr su actividad antimicrobiana completa. Su mecanismo de acción implica la disipación del potencial de membrana.
- **Subclase IIc (Otras bacteriocinas y péptidos circulares):** Aquí se agrupan péptidos con estructuras únicas. El hallazgo más notable en esta subclase son las bacteriocinas circulares; estas moléculas presen-

tan un enlace covalente entre sus extremos N-terminal y C-terminal, formando una estructura circular cerrada. Esta topología les confiere una resistencia excepcional a las proteasas gastrointestinales y a temperaturas extremas.

Clase III: Proteínas grandes termolábiles

A diferencia de las clases anteriores, son proteínas de alto peso molecular (> 30 kDa) y termolábiles (se desnaturalizan e inactivan con el calor). Su mecanismo de acción es fundamentalmente distinto: no solo alteran la membrana, sino que poseen actividad enzimática. Estructuralmente, suelen tener dominio N-terminal con actividad catalítica y un dominio C-terminal encargado del reconocimiento y unión a la célula diana. Al degradar componentes vitales como los peptidoglicanos de la pared celular, inducen la lisis directa del microorganismo.

Clase	Características principales	Subclases/Grupos	Diana molecular y mecanismo de acción	Ejemplos representativos
Clase I (Lantibióticos)	Péptidos pequeños (<5 kDa), termoestables. Poseen modificaciones postraduccionales inusuales (anillos de lantionina y β -lantionina).	Ia: Lineales. Ib: Globulares.	Diana: Lipido II. Mecanismo: Inhibición de la síntesis de peptidoglicano y formación de poros (fuga de iones y ATP).	Nisina, Epidermina, Mersacidina.
Clase II (Péptidos pequeños no modificados)	Péptidos pequeños (<10 kDa), termoestables, sin lantionina. Estructura anfifílica.	IIa: Tipo pediocina (antilisteriales). IIb: De dos péptidos (heterodímeros). IIc: Péptidos circulares (cabeza-cola) y otros.	Diana: Sistema Man-PTS o receptores de membrana. Mecanismo: Permeabilización de la membrana, disipación del potencial de membrana y fuga de metabolitos.	IIa: Pediocina PA-1, Sakacina P. IIb: Plantaricina EF, Lactococcina G. IIc: Enterocina AS-48, Lactococcina A.
Clase III (Proteínas grandes)	Péptidos pequeños (<10 kDa), termoestables, sin lantionina. Estructura anfifílica.	No aplica subdivisión clásica.	Diana: Pared celular o ácidos nucleicos. Mecanismo: Actividad enzimática (endopeptidasas o nucleasas) que induce la lisis directa de la célula diana.	Helveticina J, Milericina B.

Tabla 1. Clasificación actualizada de las bacteriocinas basada en criterios bioquímicos, estructurales y genéticos

Nota: Las antiguas clases IV y V han sido reclasificadas; los péptidos circulares ahora se agrupan en la subclase IIc. Fuente: Elaboración propia con base en El-Sayed et al. (2023) y Simons et al. (2020).

Bioconservación

La preservación de los alimentos es una preocupación crítica para prevenir enfermedades transmitidas por alimentos y minimizar el desperdicio; las técnicas clásicas, como el uso de conservadores químicos o tratamientos térmicos severos, pueden alterar las propiedades sensoriales y reducir el valor nutricional. En este contexto, la biopreservación surge como una alternativa, definida como el uso de bacterias ácido-lácticas (BAL) o sus metabolitos (como las bacteriocinas) para extender la vida útil de los alimentos, eliminando o reduciendo la dependencia de aditivos sintéticos (El-Sayed *et al.*, 2023).

La producción de fermentados mediante BAL es una escala económica y viable, siempre que se utilicen medios de cultivo de grado alimenticio, en lugar de medios complejos de laboratorio, los cuales encarecen el proceso y plantean retos a escalamiento industrial (Hernández-Figueroa *et al.*, 2024).

Estos fermentados, ricos en péptidos antimicrobianos, ácidos orgánicos y otros metabolitos bioactivos, no solo inhiben a los patógenos, sino que contribuyen a las características sensoriales (Afrah y Jacob, 2025).

¿Cuál es su impacto en salud y biotecnología?

La resistencia antimicrobiana (RAM) es una amenaza mundial para la salud pública y el desarrollo. Según datos de la Organización Mundial de la Salud, se estima que la RAM bacteriana fue directamente responsable de 1.27 millones de muertes a nivel global en 2019 (World Health Organization [WHO], 2024). Creciendo debido al uso indiscriminado de antibióticos en humanos, animales y agricultura.

Las bacteriocinas, se posicionan como una alternativa ya que son potentes péptidos antimicrobianos que tienen un gran potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades en animales. Su actividad antimicrobiana es rápida y muestran una menor propensión a desarrollar resistencia que los antibióticos convencionales. Actualmente, su principal aplicación es en sistemas de conservación de alimentos. Sin embargo, varios estudios demuestran su papel bioactivo como antimicrobianos, probióticos e inmunomoduladores (Hernández González *et al.*, 2021). Además de los probióticos bacteriocinógenos,

las bacteriocinas purificadas o parcialmente purificadas, también son muy prometedoras con respecto al tratamiento de bacterias patógenas diana y, en última instancia, pueden emplearse como fármacos y/o alternativas novedosas a los antibióticos existentes (Gillor *et al.*, 2008).

Más allá de su uso como conservadores, el consumo de BAL y sus metabolitos está redefiniendo el concepto de salud intestinal. *Lactiplantibacillus plantarum* es una bacteria altamente presente en alimentos fermentados y mucosas humanas, se ha demostrado que no solo mejora la digestión de la lactosa o controla infecciones intestinales, sino que modula el sistema inmune de la mucosa y promueve la homeostasis intestinal (Di Chiano *et al.* 2024).

En la actualidad, los consumidores demandan productos alimenticios que sean seguros, saludables y tengan una larga vida útil y sean mínimamente procesados. Las bacterias ácido-lácticas (BAL) promueven la calidad alimentaria



debido a las bacteriocinas y otros metabolitos producidos, que son generalmente considerados compuestos seguros con propiedades atractivas, como estabilidad, actividad antimicrobiana, ausencia de toxicidad y sin alteración del sabor (Cotter *et al.*, 2005). Cabe señalar que solo la nisina y la pediocina PA-1 se han comercializado como aditivos alimentarios; no obstante, otras bacteriocinas de las BAL también presentan perspectivas prometedoras para su utilización como bioconservantes en alimentos, como es el caso de la enterocina AS-48 (Sánchez Hidalgo *et al.*, 2011) o la lacticina 3147 (Villena *et al.*, 2012).



Biodiversidad y potencial antimicrobiano en fermentados tradicionales.

Las bebidas y alimentos fermentados han sido pilares de la dieta humana durante siglos, valorados no solo por su perfil sensorial y nutricional, sino también por su seguridad microbiológica. La fermentación espontánea, impulsada por microorganismos nativos sin inoculación artificial, permite que las bacterias ácido-lácticas actúen como biopreservantes naturales y probióticos, inhibiendo patógenos mediante la producción de metabolitos antimicrobianos (Afrah y Jacob, 2025; Thomas y Sanjo, 2025).

En la producción artesanal de mezcal, el mosto de agave fermentado alberga un ecosistema microbiano diverso y funcionalmente complejo. En este entorno extremo, caracterizado por un pH bajo, altas concentraciones de etanol y disponibilidad limitada de nutrientes se han identificado múltiples géneros de BAL, destacando *Lactiplantibacillus*, *Leuconostoc*, *Enterococcus* y *Levilactibacillus*; ya que son particularmente frecuentes debido a su extraordinaria adaptabilidad y capacidad de garantizar la estabilidad del proceso fermentativo (López-Sánchez *et al.*, 2026).

El vínculo entre las BAL del mezcal y las bacteriocinas

La relevancia biotecnológica de las BAL aisladas del mezcal radica en que los géneros que dominan este ecosistema son los productores de bacteriocinas de Clase II. Por ejemplo, las enterocinas (producidas por *Enterococcus*), las mesentericinas y leucocinas (de *Leuconostoc*), y las paracaseicinas (de *Lacticaseibacillus*) son péptidos termoestables con una potente actividad contra patógenos alimentarios y clínicos, incluyendo *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* e incluso cepas resistentes (El-Sayed *et al.*, 2023; Simons *et al.*, 2020).



Perspectivas futuras

Los avances en ingeniería genética y bioprocesos buscan optimizar la producción y estabilidad de bacteriocinas, abriendo la puerta a su uso masivo en alimentos funcionales y en medicina personalizada. Su papel como herramienta natural y segura las convierte en protagonistas de la lucha contra patógenos y en aliadas para una alimentación más saludable. Las líneas de investigación más prometedoras para explorarse con mayor profundidad incluyen:

- **Nanotecnología y biopolímeros activos:** El desarrollo de películas y recubrimientos comestibles a base de biopolímeros incorporando fermentados de BAL representa una frontera clave. Estos empaques activos no solo prolongan la vida útil de los alimentos, sino que funcionan como sistemas de liberación controlada de antimicrobianos en el tracto gastrointestinal (Revutskaya *et al.*, 2024).
- **Terapias psicobióticas y el eje intestino – cerebro:** La transición del concepto de “probiótico” a “psicobiótico” abre una posibilidad de ensayos clínicos en humanos. Es necesario investigar cómo las bacteriocinas y los metabolitos de cepas como *Lactiplantibacillus plantarum* pueden modular la neurotransmisión y ayudar en el manejo clínico de enfermedades neurodegenerativas, trastornos del estado de ánimo y deterioro cognitivo (Di Chiano *et al.*, 2024).
- **Revalorización de fermentados tradicionales:** Los mostos de agave, los alimentos y bebidas fermentados funcionan como “biorreactores naturales”. Las futuras investigaciones deben centrarse en el aislamiento y caracterización de las cepas nativas de estos ecosistemas, transformando el patrimonio biocultural en soluciones biotecnológicas globales contra la resistencia antimicrobiana.

Conclusiones

La resistencia bacteriana representa una amenaza vital para la medicina moderna y las bacteriocinas ofrecen una alternativa real y segura. Su capacidad para actuar sobre dianas moleculares específicas y su baja tendencia a generar resistencia las posicionan como candidatas ideales para el desarrollo de nuevos fármacos y terapias tópicas.

La consolidación de la clasificación en tres clases principales, junto con el entendimiento profundo de sus mecanismos de acción a nivel molecular, ha permitido el diseño de estrategias de biopreservación más eficaces. La combinación de bacteriocinas con tecnologías emergentes representa una vía para superar sus limitaciones.

Las propiedades psicobióticas de cepas como *Lactiplantibacillus plantarum* abren un campo de ensayos clínicos en enfermedades neurodegenerativas y trastornos metabólicos, ampliando el horizonte farmacéutico de estos péptidos.

Un hallazgo relevante para la biotecnología en Latinoamérica es la riqueza microbiológica de las fermentaciones ancestrales. Los mostos de agave (de la fermentación del mezcal) albergan ecosistemas complejos de BAL que, al sobrevivir en condiciones extremas, producen diversas bacteriocinas y metabolitos antimicrobianos.

Bacteriocinas: armas naturales contra bacterias y aliadas en la salud y la alimentación

Referencias

- Afrah, y Jacob, M. M. (2025). Antibiotic resistance patterns in lactic acid bacteria from traditional fermented Indian foods: A comprehensive review. In K. Dhanya, M. M. Jacob, y D. G. Muricken (Eds.), *MicroFrontiers 2025: Tackling antimicrobial resistance: Research, innovation & action against AMR*.
- Axelsson L. Lactic acid bacteria: Classification and physiology. En: Salmminen S, Von Wright A, Ouwenhand A, editores. (2004). *Lactic acid bacteria, microbiology and functional aspects*. 3ª ed. Nueva York: Marcel Dekker.
- Balciunas E. M., Castillo Martínez F. A., Todorov S. D., Gombossy de Melo Franco G. M., Converti A., y de Souza Oliveira R. P. (2013). Novel Biotechnological Applications of Bacteriocins: A Review. *Food Control*, 32:134–142. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.11.025>
- Cintas, L. M., Casaus M. P, Herranz C, Nes I. F, y Hernández P. E. (2001). Review: Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria. *Food Science and Technology International*, 7: 281-305. <https://doi.org/10.1106/R8DE-P6HU-CLXP-5RYT>
- Cotter P. D, Ross R. P, y Hill C. (2005). Bacteriocins: developing innate immunity for food. *Nature Reviews. Microbiology*, 3: 777-788. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1273>
- Da Silva Sabo S., Vitolo M., Domínguez González J. M., y de Souza Oliveira R. P. (2014). Overview of *Lactobacillus plantarum* as a promising bacteriocin producer among lactic acid bacteria. *Food Research International*, 64: 527-536. <https://doi.org/10.1155/2018/9361614>
- Di Chiano, M., Sallustio, F., Fiocco, D., Rocchetti, M. T., Spano, G., Pontrelli, P., Moschetta, A., Gesualdo, L., Gadaleta, R. M., y Gallone, A. (2024). Psychobiotic properties of *Lactiplantibacillus plantarum* in neurodegenerative diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17), 9489. <https://doi.org/10.3390/ijms25179489>
- El-Sayed, A. I. M., El-Sayed, I. M., y Awad, S. (2023). Bacteriocins: Nisin as an alternative source to chemical preservatives. En S. Bhattacharya y H. H. Abd-El Azim (Eds.), *Natural food preservatives*. Jenny Stanford Publishing.
- Gillor O., Vriezen J. A. C., y Riley M. A. (2008). The role of SOS boxes in enteric bacteriocin regulation. *Microbiology (Reading)*, 154(Pt 6): 1783–1792. <https://doi.org/10.1099/mic.0.2007/016139-0>



Hernández-Figueroa, R. H., López-Malo, A., y Mani López, E. (2024). Antimicrobial activity and applications of fermentates from lactic acid bacteria: A review. *Sustainable Food Technology*, 2, 292.

Hernández González J. C., Martínez Tapia A., Lazcano Hernández G., García Pérez B. E., y Castrejón Jiménez N. S. (2021). Bacteriocins from Lactic Acid Bacteria. A Powerful Alternative as Antimicrobials, Probiotics, and Immunomodulators in Veterinary Medicine. *Animals (Basel)*, 11(4): 979. <https://doi.org/10.3390/ani11040979>

López-Sánchez, C., Espinoza-Martínez, V. A., Palma-Cruz, F. de J., Enríquez-Valencia, R., Ramírez-López, M. P., Ortiz-Cortés, L. Y., & Álvarez-Gutiérrez, P. E. (2026).

Ethnobiotechnological analysis of the lactic bacterial diversity in the mezcal fermentation of four palenques in Oaxaca, Mexico. *Fermentation*, 12(2), 89. <https://doi.org/10.3390/fermentation12020089>

Mokoena M. P. (2017). Lactic Acid Bacteria and Their Bacteriocins: Classification, Biosynthesis and Applications against Uropathogens: A Mini-Review. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 22(8): 1255. <https://doi.org/10.3390/molecules22081255>

Revutskaya, N., Polishchuk, E., Kozyrev, I., Fedulova, L., Krylova, V., Pchelkina, V., Gustova, T., Vasilevskaya, E., Karabanov, S., y Kibitkina, A. (2024). Application of natural functional additives

for improving bioactivity and structure of biopolymer-based films for food packaging: A review. *Polymers*, 16(14), 1976. <https://doi.org/10.3390/polym16141976>

Sánchez Hidalgo M., Montalbán López M., Cebrián R., Valdivia E., Martínez Bueno M., y Maqueda M. (2011). AS-48 bacteriocin: close to perfection. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 68(17): 2845–2857. <https://doi.org/10.1007/s00018-011-0724-4>

Simons, A., Alhanout, K., y Duval, R. E. (2020). Bacteriocins, antimicrobial peptides from bacterial origin: Overview of their biology and their impact against multidrug-resistant bacteria. *Microorganisms*, 8(5),

639. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050639>

Thomas, S. S., & Sanjo, N. (2025). Restoring gut microbial balance to fight antimicrobial resistance through traditional probiotic foods of India. En K. Dhanya, M. M. Jacob, & D. G. Muricken (Eds.), *MicroFrontiers 2025: Tackling antimicrobial resistance: Research, innovation & action against AMR*.

Villena J., Suzuki R., Fujie H., Chiba E., Takahashi T., Tomosada Y., Shimazu T., Aso H., Ohwada S., Suda Y., Ikegami S., Itoh H., Álvarez S., Saito T., y Kitazawa H. (2012). Immunobiotic *Lactobacillus jensenii* Modulates the Toll-Like Receptor 4-Induced Inflammatory Response via Negative Regulation

in Porcine Antigen-Presenting Cells. *Clinical and Vaccine Immunology*, 19(7): 1038–1053. <https://doi.org/10.1128/CVI.00199-12>

World Health Organization. (2024, February 14). Antimicrobial resistance. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>

